1974 г. Август *Том 113, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

530.1(09)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ *)

А. Пуанкаре

В каком состоянии находится сейчас математическая физика? Какие задачи стоят перед ней сегодня? Каково ее будущее? Предстоит ли ей изменить свой характер? Останутся ли для тех, кто через десять лет придет нам на смену, цели и методы этой науки теми же, что и сейчас, или мы станем участниками глубокого преобразования? Таковы те вопросы, которые мы вынуждены задать, приступая сегодня к нашему обсуждению.

Поставить эти вопросы нетрудно, но не просто дать на них ответ. Легко удержаться от соблазна предсказать будущее. Нужно только представить себе, каких глупостей наговорили бы величайшие ученые, жившие сто лет назад, если бы их спросили, что будет представлять собой физика XIX века. Они думали бы, что они делают смелые предсказания, но какими робкими они показались бы нам после всего того, что произошло. Поэтому не ждите от меня пророчеств **).

Но хотя, как всякий благоразумный врач, я уклоняюсь от прогноза, я все же не могу не попробовать поставить диагноз; да, действительно, видны симптомы серьезного кризиса; похоже, что мы стоим на пороге перемен. Но не надо слишком беспокоиться; мы уверены, что болезнь не смертельна. Мы можем даже надеяться, что этот кризис будет благотворным и что он необходим для дальнейшего развития, так как, по-видимому, этому учит нас история прошлого. Этот кризис на самом деле не первый, и для того, чтобы понять его сущность, нужно вспомнить о тех кризисах, которые ему предшествовали, поэтому простите мне небольшое историческое отступление. Математическая физика, как мы знаем, была рождена небесной механикой в конце XVIII века в момент, когда последняя уже достигла полного развития. В первые годы своей жизни дитя поразительно походило на свою мать.

Вселенная, изучаемая астрономами, образована телами, имеющими огромные размеры, однако расстояния между ними столь велики, что для

*) A. Poincaré, L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique, Bull. des Sciences Math., sér. 2, 28 (pt. 1), 302 (1904). Перевод с французского И. Ю. Кобзарева.

Доклад А. Пуанкаре на Международном конгрессе искусства и науки в Сент-Луисе, США, 24 сентября 1904 г. Английский перевод Б. Хальстеда напечатан в журнале «The Monist» (15, 1 (1905)). Он сделан, по-видимому, с рукописи А. Пуанкаре, которая была несколько отредактирована им для публикации в «Bull. Sci. Math.». Термин «математическая физика» в названии доклада соответствует понятию «теоретическая физика» в современном смысле слова. (*Прим. перев.*)

**) В тексте перевода Хальстеда дальше следует: «Если бы я знал, какие открытия будут сделаны завтра, то я давно бы это опубликовал, чтобы закрепить за собой приоритет». (*Прим. перев.*)

нас они являются материальными точками. Эти точки притягивают друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния, и это притяжение есть единственная сила, влияющая на их движения. Представим, что наши чувства столь тонки, что мы могли бы непосредственно видеть внутреннее строение тел, изучаемых физиками. Тогда мы увидели бы зрелище, не слишком отличающееся от того, которое предстает глазам астронома. Мы снова увидели бы материальные точки, разделенные расстояниями, огромными по сравнению с их размерами, и описывающие орбиты, следуя определенным регулярным законам. Эти бесконечно малые звезды есть не что иное, как атомы. Подобно настоящим звездам они притягивают или отталкивают друг друга. Сила притяжения или отталкивания, направленная вдоль прямой, соединяющей два атома, зависит только от расстояния между ними. Возможно, что зависимость этой силы от расстояния отличается от закона Ньютона, но она очень похожа на него: вместо степени -2 мы имеем, вероятно, дело с каким-то другим показателем. Это изменение показателя порождает все разнообразие физических явлений, все многообразие качеств и ощущений, весь мир красок и звуков, окружающий нас, одним словом, всю природу.

Так выглядела эта концепция во всей ее первоначальной чистоте: для того чтобы объяснить все явления природы, нужно определить только значение показателя, необходимое для описания той или иной группы явлений. Именно этому образцу следовал Лаплас, строя свою красивейшую теорию поверхностных сил: он рассматривает эти силы как частный случай силы притяжения, или, как он выражается, силы всемирного тяготения, и не удивительно, что эта теория находится в середине одного из пяти томов его «Небесной механики». В более недавние времена Брио думал, что он разгадал последнюю тайну оптики, доказав, что притяжение атомов эфира обратно пропорционально шестой степени расстояния. Наконец, Максвелл, сам Максвелл, не утверждает ли он, что атомы газа отталкиваются друг от друга с силой, обратно пропорциональной пятой степени расстояния? Мы имеем степень -6 или -5 вместо степени -2, но это все еще степень.

Среди теорий этой эпохи только теория Фурье составляет исключение; в ней мы снова встречаем атомы, действующие друг на друга на расстоянии, они передают друг другу тепло, но они не притягивают друг друга и никогда не сдвигаются с места. С этой точки зрения теория Фурье должна была казаться современникам Фурье и ему самому предварительной и несовершенной.

Изложенная выше концепция не лишена величия: она казалась привлекательной, и многие из нас не отказались от нее окончательно. Они понимают, что проникнуть в тайны строения материи можно, только терпеливо распутывая тот запутанный клубок, который предстает нашим чувствам. Они знают, что нужно двигаться шаг за шагом, не пытаясь перескочить промежуточные ступени; они знают, что наши предтечи заблуждались, думая, что можно достичь цели одним броском; они, однако, верят, что, когда мы достигнем цели, нашим глазам снова предстанет величественная простота небесной механики.

Эта концепция отнюдь не была бесполезной; она сослужила нам неоценимую службу, она существенно помогла нам четко сформулировать фундаментальное понятие физической закономерности. Я должен объяснить, что́ я имею в виду. Вспомним, как представляли себе законы природы античные ученые. Для них закон природы был требованием некоторой внутренней соразмерности, неизменной, так сказать, статической; для них речь шла как бы о некоторой модели, которой природа оказывается вынужденной следовать. Для нас же закон природы есть нечто совершенно

другое; это есть постоянная связь между тем, что́ происходит сейчас, и тем, что́ произойдет завтра; одним словом, это дифференциальное уравнение.

Такова идеальная форма закона природы, и первым был в нее облачен закон Ньютона. В дальнейшем старались привить этот образец в физике, подражая ему как можно точнее, пытаясь имитировать небесную механику.

Однако настал день, когда концепция центральных сил оказалась недостаточной, и это был первый из кризисов, о которых я говорил.

Как тогда поступили? Решили отказаться от попыток узнать детали устройства Вселенной, не пытаться изучать по отдельности все части сложнейшего механизма и не анализировать, каковы все те силы, которые приводят его в движение. Ограничились тем, что стали руководствоваться некоторыми общими принципами, с тем чтобы избежать этой кропотливой работы. Каким образом это оказывается возможным? Представим себе, что перед нами какая-то машина. Колеса на входе и выходе нашего механизма нам доступны, но передачи и промежуточные колеса, с помощью которых движение от первого колеса передается последнему, скрыты внутри машины, и их не видно; мы не знаем, соединены ли колеса между собой зубчатыми передачами или ремнями, шатунами или какими-либо другими приспособлениями. Должны ли мы сказать, что, пока нам не позволят разобрать эту машину, мы не сможем ничего сказать об ее устройстве? Вы хорошо знаете, что это не так и что для того, чтобы установить самое существенное, достаточно принципа сохранения энергии. Мы легко можем установить, что колесо на входе машины вращается, скажем, в десять раз быстрее, чем колесо на выходе, поскольку оба эти колеса нам видны; мы можем заключить, что сила, приложенная к первому, может быть уравновешена в десять раз большей силой, приложенной ко второму. Для этого не нужно знать, каков механизм равновесия и каким именно образом компенсируются силы внутри машины, нам достаточно уверенности в том, что такая компенсация должна произойти.

Аналогичную роль играет принцип сохранения энергии и тогда, когда мы изучаем природу материи. Здесь мы снова имеем дело с машиной, намного более сложной, чем те, что находятся на заводах; почти все детали этой машины глубоко скрыты от нас, но, наблюдая движение видимых нам частей и используя этот принцип, мы можем делать выводы, справедливость которых не зависит от того, как устроен невидимый механизм, вызывающий наблюдаемые нами движения.

Принцип сохранения энергии, или принцип Майера, это, разумеется, самый важный, но не единственный из используемых нами принципов. Перечислим их.

Принцип Карно, или принцип рассеяния энергии.

Принцип Ньютона, или принцип равенства действия и противодействия.

Принцип относительности, согласно которому законы физических явлений должны быть одинаковыми как для неподвижного наблюдателя, так и для наблюдателя, находящегося в состоянии равномерного прямолинейного движения, так что не существует и не может существовать способ обнаружить, находимся ли мы в состоянии такого движения или нет.

Принцип сохранения массы, или принцип Лавуазье.

Я добавил бы еще принцип наименьшего действия.

Достаточно применить эти пять или шесть общих принципов к исследованию физических явлений для того, чтобы получить все, что мы, по-видимому, можем надеяться о них узнать. Наиболее замечательным образцом этой новой математической физики является, несомненно, электромагнитная теория света, принадлежащая Максвеллу. Мы ничего не знаем о том,

что такое эфир, как расположены его молекулы, притягивают они друг друга или отталкивают. Мы знаем, однако, что эта среда передает как оптические, так и электромагнитные возмущения; мы знаем, что эта передача происходит в соответствии с общими принципами механики, и этого оказывается достаточным для того, чтобы установить уравнения электромагнитного поля.

Наши принципы являются результатом смелого обобщения данных опыта, но сама их общность придает им высокую степень достоверности. Действительно, чем более они общи, тем чаще нам представляется возможность убедиться в их справедливости, и подтверждения, все более многочисленные, все более разнообразные и все более неожиданные, в конце концов не оставляют почвы для сомнений.

Таков второй период развития математической физики, за пределы которого мы пока не вышли. Утверждаем ли мы, что первый период был бесполезен? Что в течение пятидесяти лет наука двигалась по неправильному пути? Что нам ничего не остается, кроме как забыть о плодах длительных усилий, порожденных порочной концепцией, с самого начала обреченной на неудачу? Отнюдь нет. Думаете ли вы, что второй период мог появиться, минуя первый? Гипотеза центральных сил содержала в себе все принципы, получавшиеся как ее необходимые следствия. Из нее следовали принципы сохранения энергии и массы, равенство действия и противодействия и принцип наименьшего действия. Конечно, эти принципы при этом оказывались не экспериментальными истинами, а теоремами, а сама их формулировка была одновременно и более точной и более ограниченной, чем современная.

Именно математическая физика наших отцов постепенно познакомила нас со всеми этими принципами, именно она приучила нас распознавать эти принципы за внешними различиями их конкретных воплощений. Принципы сравнивали с опытом или устанавливали, как нужно модифицировать их формулировки для приведения их в соответствие с его результатами; при этом их содержание расширилось, и они стали более достоверными. Таким образом, мы пришли к тому, что стали рассматривать их как экспериментальные истины; концепция центральных сил превратилась в бесполезную подпорку и даже стала казаться неприятной, поскольку она придавала принципам присущий ей привкус гипотетичности.

Остов не пришлось ломать, поскольку он был гибким; но его расширили. Наши отцы, построившие его, работали не напрасно — в науке сегодняшнего дня мы узнаём общие черты намеченного ими плана.

Вступаем ли мы в третий период? Стоим ли мы на пороге второго кризиса? Должны ли мы взять под подозрение принципы, на которых мы все построили? С некоторого момента этот вопрос приходится задавать.

Услышав мои слова, вы, несомненно, подумаете о радии, этом великом революционере нашего времени, и действительно, я скоро к нему вернусь, но это еще не все. Не только закон сохранения энергии подвергается сомнению; рассмотрев принципы физики один за другим, мы увидим, что все они находятся в опасности.

Начнем с принципа Карно. Этот принцип, единственный из всех, не следует из гипотезы центральных сил; более того, если он и не находится в прямом противоречии с ней, то их согласование требует определенных усилий. Если все физические явления обусловлены движением атомов, притяжение между которыми зависит только от расстояния, то, кажется, все эти явления должны быть обратимыми. Если заменить направления всех скоростей на противоположные, то атомы, находясь под действием тех же сил, начнут двигаться вспять по своим траекториям, в точности так же, как Земля стала бы двигаться вспять по той же эллиптической

орбите, по которой она движется сейчас вперед. Если некий физический процесс оказывается возможным, то должен быть возможен и обратный процесс, и, таким образом, мы оказались бы в состоянии обратить вспять течение времени. Принцип Карно учит нас, однако, тому, что в природе это не так. Теплота может перейти от горячего тела к холодному, невозможно, однако, осуществить обратный переход, восстанавливающий исчезнувшую разность температур. Движение может быть полностью уничтожено и посредством трения превращено в тепло, но обратное превращение может быть осуществлено только частично.

Пытались разрешить это кажущееся противоречие. Мир стремится к единообразию не потому, что его мельчайшие части, будучи сначала различными, становятся постепенно все более и более сходными, а потому, что, двигаясь случайным образом, они в конце концов перемешиваются. Для взгляда, различающего элементарные единицы, различия всегда остаются. Каждая пылинка сохраняет свою индивидуальность и не становится похожей на соседей, однако по мере того, как перемешивание становится все более и более хорошим, нам, в силу грубости наших чувств, все начинает казаться однородным. Вот почему температуры стремятся выравниться, а процесс, обратный выравниванию температур, оказывается невозможным.

Пусть капля вина попадает в стакан воды; каковы бы ни были законы движения жидкости, мы скоро увидим равномерную розовую окраску. С этого момента, как бы мы ни трясли стакан, вино и вода, по-видимому, никогда не смогут разделиться; легко спрятать зерно ржи в чаше пшеницы, но найти его и извлечь практически невозможно; такова же и природа необратимых физических процессов. Все это было разъяснено Максвеллом и Больцманом; наиболее ясно понял и изложил проблему Гиббс в книге «Элементарные принципы статистической физики»; ее, к сожалению, мало читают, так как это нелегкое дело.

Для того, кто стал на эту точку зрения, принцип Карно есть принцип приблизительный, нечто вроде уступки слабости наших органов чувств. Только из-за того, что наше зрение так грубо, мы не различаем в смеси ее составных частей; только потому, что наши пальцы слишком грубы, мы не можем разделить частицы смеси; воображаемый демон Максвелла, который может рассортировать отдельные молекулы, мог бы вернуть мир в начальное состояние. Может ли мир сделать это сам по себе? Это не невозможно, это только очень мало вероятно. Нам пришлось бы очень долго ждать, пока стечение обстоятельств, приводящее к возвращению назад, реализуется; однако рано или поздно такое состояние осуществится; нужны, однако, миллионы цифр, чтобы записать на бумаге число лет, которое потребуется на ожидание. Эти оговорки оставались теоретическими и не вызывали беспокойства; принцип Карно сохранял все свое практическое значение. Но здесь сцена меняется. Биологи, вооруженные своими микроскопами, давно уже заметили беспорядочные движения мелких частиц в суспензиях. Эти движения называются броуновскими; сначала думали, что эти движения есть проявления жизни, но скоро установили, что неодушевленные частицы танцуют не менее энергично; тогда вопрос был передан физикам. К сожалению, физики долго пренебрегали этой проблемой; они думали, что движения, о которых мы говорим, связаны с тем, что препараты освещаются светом; думали, что свет вызывает нагревание и неравномерность температуры порождает потоки в жидкости, вызывающие явления, о которых мы говорим.

Гюи решил исследовать вопрос более тщательно; он показал, или считал, что показал, что такое объяснение не годится; движения становятся тем быстрее, чем мельче частицы, в то время как способ освещения на них

не влияет. Но если это движение никогда не прекращается, или, точнее, все время создается заново при отсутствии внешних источников энергии, то что же мы должны думать? Разумеется, нам не нужно отказываться от закона сохранения энергии, но мы видим, как на наших глазах движение в результате трения переходит в тепло и, наоборот, тепло превращается снова в движение, причем без потерь, поскольку движение длится вечно. Это противоречит принципу Карно. Если это так, то для того, чтобы видеть, как мир возвращается назад, нам не нужно иметь бесконечно острое зрение максвелловского демона, достаточно наших микроскопов. Тела достаточно большие, размером, скажем, в десятую долю миллиметра, испытывают со всех сторон удары атомов, но они не приходят в движение из-за того, что эти толчки столь многочисленны, так что в соответствии с законами вероятности они компенсируются. Для частиц меньших размеров число ударов оказывается слишком мало́, чтобы компенсация соблюдалась всегда; в результате они все время получают толчки и беспорядочно движутся. И вот уже мы видим, что один из наших принципов в опасности.

Мы переходим теперь к принципу относительности. Этот принцип не только подтверждается нашим повседневным опытом, не только является необходимым следствием гипотезы центральных сил,— этот принцип с непреодолимой силой навязывается нам нашим здравым смыслом, и все же и здесь появились бреши. Рассмотрим два наэлектризованных тела; хотя нам они кажутся покоящимися, они участвуют в движении Земли. Как научил нас Роуланд, движущийся заряд эквивалентен току, поэтому эти два заряженных тела эквивалентны двум параллельным токам одинакового знака, а такие токи должны притягивать друг друга. Измеряя это притяжение, мы измеряем скорость движения Земли, не скорость относительно Солнца или неподвижных звезд, а абсолютную скорость.

Я хорошо знаю, что мне могут сказать, что таким образом измеряется не абсолютная скорость, а скорость относительно эфира. Но как мало удовлетворителен такой ответ! Разве не очевидно, что из принципа относительности, понимаемого таким образом, уже ничего нельзя извлечь? Этот принцип уже больше ничего нам не говорил бы, поскольку ему теперь не угрожали бы никакие противоречия. Что бы мы ни измерили, мы всегда смогли бы сказать, что мы измеряем не абсолютную скорость и не скорость относительно эфира, а скорость относительно какой-то новой неизвестной жидкости, которой мы можем заполнить пространство.

К счастью, опровержение такой интерпретации принципа относительности взял на себя опыт; все попытки измерить скорость Земли относительно эфира дали отрицательный результат. На этот раз экспериментальная физика оказалась более верной нашему принципу, чем физика математическая. Теоретики готовы были принести его в жертву, чтобы согласовать остальное, опыт, однако, упрямо его подтверждает. Было испробовано много разных способов; наконец, Майкельсон довел точность до предела; ничего не было обнаружено. Для того чтобы объяснить эти упрямые факты, современные математики вынуждены до предела напрягать свою изобретательность.

Задача была нелегкой, и Лоренц смог с ней справиться только ценой целого ряда гипотез.

Самой остроумной была идея ввести местное время. Представим себе двух наблюдателей, которые хотят сверить свои часы с помощью световых сигналов; для того чтобы учесть, что распространение света не происходит мгновенно, они производят перекрестный обмен сигналами. Если в точке B принимают сигнал, переданный из точки A, то находящиеся

в B часы показывают не то время, которое показывали часы в A в момент отправления сигнала, а время с добавлением поправки, учитывающей время распространения. Предположим, например, что из точки A посылают сигнал, когда часы показывают время 0, и что в точку B этот сигнал приходит в момент, когда часы в B показывают время t. Показания часов согласованы, если запаздывание t равно времени распространения сигнала. Для того чтобы это проверить, надо в тот момент, когда часы в B покажут нуль, послать сигнал в A, тогда в точке A его должны принять в момент времени t. В этом случае показания часов согласованы.

Действительно, очевидно, что наши часы показывают равные времена в один и тот же момент физического времени, но только при одном существенном условии, а именно, если обе точки неподвижны. В противном случае времена распространения вперед и назад не будут одинаковыми из-за того, что, скажем, часы в A движутся навстречу оптическому возмущению, распространяющемуся из B, в то время как точка B убегает от оптического возмущения, распространяющегося из A. Часы, установленные описанным выше способом, не будут тогда показывать истинное время, они будут показывать так называемое *местное время*, так что одни часы будут отставать от других на некоторую определенную величину. Но это не существенно, так как у нас нет способа это заметить. Все явления, происходящие, скажем, в точке A, в равной степени запаздывают, и наблюдатель, который захочет это установить, не сможет ничего обнаружить, поскольку его часы запаздывают; в соответствии с принципом относительности у него не будет никакого способа узнать, находится ли он в состоянии покоя или абсолютного движения.

К сожалению, этого не достаточно, нужны дополнительные гипотезы. Необходимо предположить, что движущиеся тела испытывают однородное сокращение в направлении своего движения. Так, например, один из диаметров Земли в результате движения планеты должен сократиться на 1/200 000 000 часть, в то время как другой сохраняет свою обычную величину. Таким образом удается скомпенсировать последние малые различия. Далее нужна еще гипотеза о силах. Все силы, каково бы ни было их происхождение, как гравитационные, так и упругие, должны измениться в определенной пропорции в мире, приведенном в состояние равномерного прямолинейного движения. Точнее, это должно иметь место для компонент сил, перпендикулярных к направлению движения; параллельные компоненты не изменяются. Вернемся к нашему примеру с двумя наэлектризованными телами. Эти тела отталкивают друг друга, но если вся система находится в состоянии равномерного движения, то эти тела эквивалентны двум параллельным токам одного знака, которые друг друга притягивают.

Это электродинамическое притяжение уменьшает, таким образом, электростатическое отталкивание, и полное отталкивание оказывается слабее, чем для двух тел в покое. Для того чтобы измерить это отталкивание, мы должны уравновесить его какой-то другой силой, но поскольку все другие силы уменьшаются в той же пропорции, мы ничего не сможем увидеть. Таким образом, все улажено, но исчезли ли все наши сомнения? Что случится, если мы сможем обмениваться сигналами несветовой природы, скорость распространения которых отлична от скорости света? Если после того, как мы согласовали наши часы с помощью оптической процедуры, мы захотели бы сверить наши часы с помощью таких новых сигналов, мы обнаружили бы расхождения, которые продемонстрировали бы нам общее движение обеих точек. А если мы вместе с Лапласом примем, что всемирное тяготение распространяется со скоростью, в миллион раз превышающей скорость света, то являются ли такие сигналы немыслимыми?

Таким образом, в последнее время принцип относительности энергично защищали, но сама энергия, с которой вели защиту, показывает, что угроза была велика.

Обсудим теперь принцип Ньютона, условие равенства действия и противодействия. Этот принцип тесно связан с предыдущим, и представляется правдоподобным, что падение одного повлечет за собой падение и второго. Поэтому мы не должны удивляться, встречая здесь те же трудности.

Мы считаем, что электрические явления связаны с колебаниями микроскопических заряженных частиц, называемых *электронами*, погруженных в среду, которую мы называем *эфиром*. Движения электронов порождают возмущения в окружающем их эфире, эти возмущения распространяются во все стороны со скоростью света. В свою очередь другие электроны, первоначально покоившиеся, начинают колебаться, когда возмущение достигнет окружающего их эфира. Таким образом, электроны действуют друг на друга, но это действие не непосредственно, оно происходит через посредство эфира. Возможно ли, чтобы в этих условиях действие и противодействие компенсировались для наблюдателя, который учитывал бы только движение материи, т. е. электронов, и не принимал бы в расчет невидимых для него движений эфира? Очевидно, нет. Даже если бы компенсация была полной, она не могла бы быть одновременной. Возмущение распространяется с конечной скоростью, поэтому оно достигнет второго электрона только тогда, когда колебания первого электрона давно прекратились. Второй электрон испытывает, таким образом, с некоторым запозданием воздействие первого, но очевидно, что он не окажет ему никакого противодействия, поскольку вокруг первого электрона ничего уже не движется.

Дальнейший анализ позволяет сделать более определенные заключения. Рассмотрим, например, герцевский излучатель типа употребляющихся обычно в беспроволочной телеграфии. Он излучает энергию во все стороны, но мы можем заставить его излучать всю энергию в каком-то определенном направлении, снабдив его параболическим зеркалом, как делал Герц с самыми небольшими из своих излучателей. Что тогда должно произойти согласно теории? Аппарат должен испытать отдачу так, как если бы он был орудием, а излученная им энергия снарядом. Это противоречит принципу Ньютона, поскольку наш снаряд не имеет массы и является не веществом, а энергией. То же самое относится к снабженному отражателем прожектору типа ставящихся на маяках, поскольку свет есть не что иное, как электромагнитное возмущение. Такой прожектор должен испытывать отдачу так, как если бы испускаемый им свет был снарядом. Какая сила вызывает эту отдачу? Это есть то, что называется *давлением Максвелла — Бартольди*. Это давление очень незначительно, даже с помощью самых чувствительных радиометров его нелегко обнаружить; достаточно, однако, знать, что оно существует.

Если вся энергия, излученная генератором, попадает в приемник, то это производит на него такое же действие, как механический толчок, и при этом в известном смысле отдача генератора скомпенсируется; действие станет равным противодействию, но не мгновенно; приемник придет в движение, но не в тот момент, когда передатчик испытает отдачу. Если энергия будет распространяться бесконечно, не встречая приемника, компенсация никогда не произойдет.

Скажем ли мы, что пространство, разделяющее приемник и передатчик, в котором возмущение движется от приемника к передатчику, в действительности никогда не является пустым, что в нем присутствует не только эфир, но и воздух и что даже в межпланетном пространстве присутствует какая-то тончайшая, но все же весомая материя, скажем

ли, что эта материя испытывает, так же как приемник, толчок в момент, когда ее достигает волна, и отдачу в момент, когда возмущение ее оставляет,— это спасло бы принцип Ньютона, но это не так. Если бы энергия в процессе распространения всегда была связана с каким-то материальным субстратом, то движущаяся материя увлекала бы свет. Однако Физо показал, что, по крайней мере для воздуха, ничего подобного не происходит. Впоследствии это было подтверждено Майкельсоном и Морли. Можно предположить, что движения материи в собственном смысле компенсируются движениями эфира, но это привело бы нас к уже обсуждавшейся ситуации. Обобщенный таким образом принцип объясняет все, что угодно, так как, каковы бы ни были видимые движения, всегда можно придумать компенсирующие их невидимые. Но именно из-за того, что он все объясняет, он ничего не позволяет предсказать, он не помогает нам выбрать между различными возможными гипотезами, поскольку уже все объяснено. Поэтому он становится бесполезным.

Кроме того, предположения, которые нужно сделать относительно движений в эфире, не очень удовлетворительны. Было бы естественно предположить, что если удвоить электрические заряды, то скорости различных атомов эфира должны удвоиться. В действительности же получается, что для компенсации средняя скорость эфира должна учетвериться.

Поэтому я в течение долгого времени считал, что от этих следствий теории, противоречащих принципу Ньютона, рано или поздно придется отказаться, однако последние опыты, в которых исследовалось движение электронов, излучаемых радием, скорее их подтверждают.

Я перехожу теперь к принципу Лавуазье — требованию сохранения массы: разумеется, его нельзя затронуть, не перестраивая всю механику. Сейчас, однако, некоторые думают, что этот принцип кажется справедливым только из-за того, что в механике мы имеем дело с малыми скоростями и что для тел, движущихся со скоростями, сравнимыми со скоростью света, он перестает выполняться. Сейчас считают, что такие скорости наблюдаются: катодные лучи или излучение радия, возможно, состоят либо из каких-то чрезвычайно малых частиц, либо из электронов, вылетающих со скоростями, которые, конечно, меньше скорости света, но могут составлять от одной десятой до одной трети ее.

Эти лучи можно отклонять с помощью электрических и магнитных полей. Сравнивая эти отклонения, можно найти скорость частиц и их массу (точнее, отношение заряда к массе). Обнаружили, однако, что, когда скорости приближаются к скорости света, необходимо вносить поправки. Поскольку частицы заряжены, их нельзя ускорить, не возмущая эфир; для того чтобы привести их в движение, необходимо преодолеть двойную инерцию — инерцию самой частицы и инерцию эфира. Таким образом, измеряемая нами полная или видимая масса состоит из двух частей — истинной, или механической, массы частицы и электромагнитной массы, связанной с инерцией эфира.

Вычисления Абрагама и опыты Кауфмана показали, что собственная, истинно механическая, масса равна нулю и что масса электронов имеет чисто электромагнитную природу, по крайней мере для отрицательных электронов. Это заставляет нас изменить определение массы; мы более не можем различать механическую и электромагнитную массы, поскольку массы первого рода вообще не существует; не существует другой массы, кроме связанной с электромагнитной инерцией. Но в этом случае масса не может быть постоянной, она растет со скоростью. Более того, масса оказывается зависящей от направления, и тело, движущееся с большой скоростью, оказывает разное сопротивление силам, изменяющим

направление его движения, и силам, ускоряющим или замедляющим это движение.

Нам, как будто, еще остается выход: мельчайшими частицами материи являются электроны, либо отрицательные, либо положительные. Тогда, как мы установили, отрицательные электроны не имеют массы, но из того немногого, что мы знаем о положительных, следует, что они, по-видимому, намного тяжелее. Может быть, они наряду с электродинамической массой обладают также и массой механической. Тогда основная масса тел будет в основном связана с механической массой положительных электронов, поскольку вклад отрицательных электронов пренебрежимо мал. При таком определении она могла бы быть постоянной.

Увы! В действительности эта возможность от нас также ускользает. Вспомним то, что мы говорили о принципе относительности и об усилиях, предпринятых для его спасения. И дело не только в том, что нам хочется спасти этот принцип,— этого требуют от нас неоспоримые результаты опыта Майкельсона. Как мы уже видели выше, для того чтобы объяснить эти результаты, Лоренц был вынужден предположить, что любые силы, независимо от их происхождения, умножаются на определенный коэффициент в системе, приведенной в равномерное движение. Недостаточно, однако, сделать это предположение относительно реальных сил, то же самое нужно предположить и относительно сил инерции: необходимо еще,— говорит он,— чтобы *масса любой частицы при переходе ее в состояние равномерного движения менялась так же, как и электромагнитная.*

Таким образом, механические массы должны меняться по такому же закону, как электромагнитные, поэтому они не могут быть постоянными.

Нужно ли говорить о том, что падение принципа Лавуазье влечет за собой падение принципа Ньютона? Последний означает, что центр тяжести изолированной системы движется по прямой линии, но если не существует постоянной массы, то не существует и центра тяжести; мы больше не знаем, что это такое. Именно поэтому я и говорил, что опыты с катодными лучами, по-видимому, подтверждают сомнения Лоренца, касающиеся принципа Ньютона.

Из всех этих результатов, если они будут подтверждены, возникла бы новая механика. Основной ее чертой была бы абсолютная невозможность достичь скорости, большей скорости света, подобно тому как невозможно получить температуру, меньшую абсолютного нуля *). Для наблюдателя, находящегося в состоянии равномерного движения и не знающего об этом, кажущиеся скорости никогда не превышали бы скорости света; это приводило бы к противоречию, если не учесть, что такой наблюдатель будет пользоваться не теми же часами, что и покоящийся наблюдатель, а часами, показывающими местное время.

Здесь мы стоим перед вопросом, относительно которого я ограничусь только его постановкой. Если массы больше нет, то что станет с законом тяготения Ньютона?

Масса имеет два аспекта, она одновременно является и мерой инерции, и тяготеющей массой, входящей в выражение для силы ньютонова тяготения. Если инерционная масса не постоянна, то может ли остаться постоянной гравитирующая? Вот вопрос, встающий перед нами.

По крайней мере, у нас остается закон сохранения энергии, по-видимому, являющийся более надежным. Нужно ли мне напоминать вам, что и он подвергается сомнению? Об этом событии, наделавшем больше шума,

*) Поскольку тела оказывали бы растущее сопротивление силам, ускоряющим их движение, и эта инерция становилась бы бесконечной при приближении к скорости света.

чем все предшествующие, можно прочитать в любой научной статье. После первых работ Беккереля, а особенно после того, как Кюри открыли радий, стало ясно, что любое радиоактивное тело является неистощимым источником различных излучений. Эта активность сохраняется без изменений в течение месяцев и лет. С точки зрения наших принципов это является серьезным затруднением; эти излучения в действительности представляют собой излучение энергии, и все та же крупица радия без конца ее выделяет. Первоначально считали, что это выделение энергии столь мало, что измерить его невозможно; по крайней мере, так думали и поэтому не слишком беспокоились.

Положение изменилось после того, как Кюри догадался поместить радий в калориметр; оказалось, что количество этого непрерывно выделяемого тепла весьма значительно.

Было предложено много разных объяснений, но в этом случае не скажешь: чем больше, тем лучше,— пока одно из них не оказалось лучше всех остальных, мы не можем сказать, что среди предложенных объяснений есть хоть одно правильное. Однако с некоторых пор одно из этих объяснений стало казаться предпочтительным, и мы можем с известным основанием надеяться, что держим в руках ключ от тайны.

Сэр Рамзей пытался показать, что радий находится в процессе превращения, что он содержит запас энергии, который огромен, но не неисчерпаем. Если это так, то при превращении радия выделяется в миллион раз больше энергии, чем при любых других известных превращениях; радий должен истощиться за время 1250 лет; это не долго, вы видите, что у нас будет ясность по крайней мере через несколько сотен лет. Пока же мы продолжаем сомневаться.

Что же осталось стоять нетронутым среди всех этих развалин? Принцип наименьшего действия остался неприкосновенным, и Лармор считает, по-видимому, что он переживет все остальные принципы; несомненно, что этот принцип и самый общий, и самый неопределенный.

Какую позицию должна занять математическая физика перед лицом этой картины разрушения всех своих основных принципов? Прежде чем начинать беспокоиться, надо сначала спросить, действительно ли все это верно. Все эти противоречия с принципами обнаруживаются в области бесконечно малого; для того чтобы увидеть броуновское движение, нужен микроскоп, электроны имеют ничтожную массу, радий очень редок, никто его не видел в количестве, превышающем несколько миллиграмм. Можно задать тогда вопрос: нет ли, кроме тех бесконечно малых, которые мы сейчас видим, еще каких-то других, с помощью которых все сбалансируется?

Это, конечно, ключевой вопрос, и, по-видимому, только опыт может дать на него ответ. Нам остается обратиться к экспериментаторам и, ожидая, пока они окончательно разрешат спор, не думать обо всех этих неприятных проблемах, а спокойно продолжать свою работу так, как если бы наши принципы оставались незыблемыми. Разумеется, многое можно сделать, не выходя из области, где их применимость несомненна; у нас, в нашу эпоху сомнений, еще остается достаточно широкое поле деятельности.

Что же касается самих этих сомнений, то действительно ли мы не можем ничего сделать для того, чтобы избавить от них науку? Вполне можно сказать, что они порождены не только экспериментальной физикой; математическая физика тоже внесла свой вклад. Экспериментаторы заметили, что радий выделяет энергию, но именно теоретики обнаружили все трудности, связанные с проблемой распространения света в движущихся средах; если бы не теоретики, мы бы вряд ли о них узнали. Что же, раз

они сделали все, чтобы завести нас в эти дебри, теперь они должны помочь нам выбраться из них.

Они должны подвергнуть критическому анализу те новые взгляды, которые я вам излагал, помня, что принципы можно будет оставить только после того, как будут сделаны все усилия для того, чтобы их сохранить. Что можно в этом направлении сделать? Именно это я и попытаюсь объяснить.

Вопросы, связанные с кинетической теорией газов, несомненно, занимают особое место среди самых интересных проблем математической физики.

В этом направлении многое уже сделано, но многое еще остается сделать. Эта теория — какой-то вечный парадокс. В посылке мы имеем обратимость, в результатах — необратимость; между ними зияет пропасть. Достаточно ли статистических соображений, закона больших чисел, чтобы ее заполнить? Есть много темных пунктов, к которым надо вернуться и, вероятно, не один раз. В процессе их разъяснения мы сможем лучше понять смысл принципа Карно и его место среди динамических законов, и тогда мы будем лучше вооружены для того, чтобы объяснить любопытный опыт Гюи, о котором я говорил выше.

Не должны ли мы также попытаться создать более удовлетворительную электродинамику движущихся тел? Как было подробно объяснено выше, именно здесь накапливаются трудности. По-видимому, обойтись без многочисленных гипотез нельзя, невозможно сохранить сразу все принципы. До сих пор удавалось спасти одни, только жертвуя другими, но надежда на более удовлетворительные результаты еще не потеряна. Поэтому примем электродинамику Лоренца, будем «крутить» ее так и этак, понемногу ее изменять; может быть, постепенно все образуется.

Так, например, вместо того, чтобы предполагать, что все тела сокращаются в направлении своего движения и что это сокращение одинаково для всех тел, независимо от их строения и природы действующих в них сил, не могли ли бы мы предложить более простую и естественную гипотезу? Мы можем представить себе, что на самом деле при движении материальной среды относительно эфира изменяется как раз соприкасающийся с ней эфир и что это изменение таково, что теперь он уже не передает с равной скоростью возмущений, распространяющихся в разных направлениях. Эфир мог бы передавать возмущения, распространяющиеся параллельно или антипараллельно движению с большей скоростью, чем возмущения, распространяющиеся в перпендикулярном направлении. Волновые поверхности тогда будут не сферами, а эллипсоидами, и мы тогда могли бы обойтись без этого странного сокращения всех тел.

Я привожу это только как пример, поскольку очевидно, что можно испробовать огромное количество разных вариантов.

Возможно также, что астрономия сможет когда-нибудь дать нам сведения, относящиеся к обсуждаемому вопросу; именно она поставила эту проблему, познакомив нас с явлением аберрации. Если мы пытаемся построить в грубых чертах теорию аберрации, то получается очень странная вещь. Видимые положения звезд отличаются от истинных из-за движения Земли; поскольку это движение меняется, меняются и видимые положения. У нас нет способа установить истинное положение, но мы можем обнаружить изменения в видимом положении. Таким образом, наблюдения аберрации дают нам сведения не о движении Земли, а об изменении этого движения; поэтому они не могут нам ничего сказать об абсолютном движении Земли.

Это, во всяком случае, верно в первом приближении; но если бы мы могли измерять углы с точностью до тысячных долей секунды, то это было бы уже не так. Тогда оказалось бы, что амплитуда колебаний зависит

не только от изменений скорости, которые хорошо известны, так как они обусловлены движением нашей планеты по эллиптической орбите, но также от усредненного движения, таким образом, что константа аберрации не была бы одинаковой для всех звезд, и наблюдение соответствующих различий позволило бы определить абсолютное движение Земли в пространстве.

Это было бы опять нарушением принципа относительности, проявляющимся в несколько иной форме. В настоящее время мы далеки от того, чтобы измерять тысячные доли секунды. Однако, как говорят некоторые, полная абсолютная скорость Земли в конце концов может быть и больше, чем ее относительная скорость относительно Солнца. Если бы речь шла не о 30 *км/сек*, а, например, о 300 *км/сек*, то этого было бы достаточно для того, чтобы наблюдать обсуждаемое явление.

Я думаю, что в этом рассуждении использована слишком простая теория аберрации. Как я говорил вам, Майкельсон показал, что невозможно обнаружить абсолютное движение с помощью физических методов. Я убежден, что, независимо от точности измерений, это будет справедливо также и для астрономических методов.

Однако, как бы то ни было, сведения, которые астрономия даст нам по этому вопросу, будут когда-нибудь иметь для физиков неоценимое значение. В ожидании результата этих опытов я думаю, что теоретикам следует, учитывая результаты опыта Майкельсона, считать, что он будет отрицательным, поэтому они сделали бы полезное дело, построив теорию аберрации, которая заранее бы его объяснила.

Но вернемся на Землю. Здесь также мы могли бы помочь экспериментаторам. Мы можем, скажем, подготовить почву, тщательно исследуя динамику электронов, не придерживаясь при этом какой-то одной гипотезы, а наоборот, стараясь, насколько возможно, увеличить число альтернативных гипотез. Физики, используя наши работы, должны были бы тогда предложить критический опыт, который позволил бы выбрать между различными гипотезами.

Существуют разные подходы к построению динамики электронов. Среди ведущих к ней путей есть один, которым несколько пренебрегают, а между тем это один из тех, которые обещают нам наибольшие сюрпризы. Мы знаем, что линии спектров излучения порождаются движением электронов. Это доказывается явлением Зеемана: то, что колеблется в излучающем теле, испытывает действие магнита и, следовательно, имеет заряд. Это очень важный исходный пункт, но никто не пошел дальше: почему распределение спектральных линий подчиняется вполне определенному закону? Экспериментаторы детальнейшим образом изучили эти закономерности; они очень точны и довольно просты. На первый взгляд распределение линий напоминает о гармониках, встречающихся в акустике; однако на самом деле различие очень велико. Не только частоты не оказываются целыми кратными заданного числа, но мы даже не обнаруживаем ничего похожего на корни тех трансцендентных уравнений, к которым нас приводит столь большое число задач математической физики, например задача о колебаниях упругого тела произвольной формы, герцевские колебания в излучателе произвольной формы, задача Фурье об охлаждении массивного тела.

Законы спектральных линий оказываются более простыми, но они имеют совершенно другую природу; упомяну лишь об одном из основных различий: для гармоник высокого порядка число колебаний (частота) стремится к конечному пределу вместо того, чтобы расти бесконечно.

Эти явления еще не объяснены, и я думаю, что мы имеем здесь дело с одной из важнейших тайн природы. Интересная попытка была пред-

принята Линдеманом, но, как мне кажется, она не увенчалась успехом; эта попытка должна быть повторена. Здесь мы, так сказать, проникаем в самые глубины материи. В том положении, в котором мы сейчас находимся, представляется, что когда мы поймем, почему колебания раскаленных тел отличаются от хорошо знакомых нам обычных упругих колебаний, когда мы поймем, почему электроны ведут себя не так, как обычные тела, мы будем лучше понимать динамику электронов и, может быть, нам будет легче согласовать ее с основными принципами.

Предположим, что все усилия окажутся напрасными; а, в конце концов, я не думаю, что это произойдет. Что же мы должны будем делать? Нужно ли будет пытаться поправлять разрушенные принципы, так сказать, «руками»? Очевидно, что это всегда можно сделать, и я не отказываюсь сейчас от того, что говорил раньше. Если бы вы хотели вступить со мной в спор, вы бы спросили меня, разве вы не писали, что принципы физики, хотя они и имеют экспериментальное происхождение, не могут уже быть опровергнуты опытом, поскольку они стали теперь простыми соглашениями. Теперь же вы говорите, что последние достижения экспериментальной физики ставят их под сомнение.

Что же, я был прав раньше, но и сейчас я не ошибаюсь. Я был прав раньше, и то, что происходит сейчас, является тому новым доказательством. Рассмотрим, например, опыт, который Кюри, используя калориметр, произвел с радием. Можно ли согласовать его с принципом сохранения энергии? Это пытались сделать многими способами, но среди них есть один, на который я хотел бы обратить ваше внимание; это не объяснение, кажущееся наилучшим, но это одно из тех, которые обсуждались. Рассматривали предположение, что на самом деле радий всего лишь играет роль посредника, собирая какое-то излучение неизвестной природы. Это излучение заполняет все пространство и свободно проходит через все тела, за исключением радия, никак не действуя на них и не изменяясь само. Только радий способен поглощать часть энергии этого излучения, а затем в различных формах отдавать ее нам.

Какое прекрасное, какое удобное объяснение! Во-первых, оно непроверяемо, а в силу этого и неопровержимо. Далее, им можно воспользоваться для объяснения любых нарушений принципа Майера, оно заранее отвечает не только на возражения Кюри, но и на любые другие возражения, которые могут быть сделаны экспериментаторами в будущем. Эта новая неведомая энергия годится для чего угодно.

Это как раз то, о чем я говорил когда-то, и, таким образом, мы действительно видим, что наши принципы не могут быть опровергнуты опытом.

Но, в конце концов, чего же мы достигли этим искусственным фокусом? Принцип сохранен, но на что он теперь пригоден? Раньше с его помощью мы могли предвидеть, что в таких-то обстоятельствах мы можем рассчитывать на такое-то количество энергии; он нас как-то ограничивал. Теперь, однако, в своей новой форме он представляет в наше распоряжение неограниченный источник новой энергии, и теперь нас ничто не стесняет. В соответствии с тем, что я писал раньше, принцип перестает быть плодотворным; эксперимент, не опровергая его, тем не менее выносит ему приговор.

Таким образом, это не тот путь, по которому следовало бы пойти; нам пришлось бы начать все заново. Если все же мы будем к этому принуждены, у нас все же останется некоторое утешение. Не нужно тогда думать, что наука прядет пряжу Пенелопы и создает всего лишь эфемерные сооружения, которые ей вскоре приходится разрушать своими руками от кровли до основания.

Как я уже говорил, мы уже переживали такой кризис. Я говорил вам, что в математической физике второго периода, в физике принципов, мы находим следы предшествовавшей ей физики, физики центральных сил; то же самое мы увидим, если нам придется изучать третью. Линяющее животное сбрасывает старый тесный панцирь и создает себе новый, но и под новой оболочкой мы без труда узнаем сохранившиеся черты прежнего организма.

Мы не можем предвидеть, в каком направлении мы должны будем расширить границы; возможно, что кинетическая теория газов будет развита дальше и послужит образцом для других теорий. В этом случае явления, которые представляются нам простыми, оказались бы результатом суммирования огромного количества элементарных актов, которые только в результате действия законов случая давали бы определенный окончательный эффект. Законы физики в этом случае приобретут совершенно новый характер; они не будут уже сводиться к дифференциальным уравнениям, а приобретут характер статистических законов.

Возможно также, что мы должны будем создать совершенно новую механику, которую сейчас можем только смутно предвидеть. В этой механике инерция увеличивалась бы со скоростью, а скорость света стала бы непреодолимым барьером. Обычная, более простая, механика осталась бы первым приближением, справедливым, пока скорости остаются достаточно малыми, и, таким образом, старая динамика содержалась бы в новой. Нам не пришлось бы сожалеть о нашей вере в принципы физики, и даже, поскольку скорости, при которых старые формулы нарушались бы, встречались бы только в исключительных случаях, мы должны были бы действовать так, как если бы продолжали в них верить. Эти принципы столь полезны, что мы по-прежнему должны были бы сохранить для них место. Отказавшись от них, мы лишились бы драгоценнейшего оружия. Заканчивая, я должен подчеркнуть, что это еще не произошло и что отнюдь не доказано, что принципы не выйдут из сражения победоносными и неизменными.