

Эйнштейн и развитие физики*)

Я очень рад, что мне представилась возможность воздать дань уважения Эйнштейну. Влияние Эйнштейна на развитие физики невообразимо велико, и я попытаюсь объяснить, в чем оно состоит.

Эйнштейна глубоко волновали основания физики, ее фундаментальные законы, и он решительным образом полностью изменил наш образ мышления. До Эйнштейна ученые оперировали обычными представлениями о пространстве и времени. Установив в пространстве и времени какие-нибудь структуры, они пытались, исходя из экспериментальных результатов, найти законы, которым эти структуры подчиняются. Метод Эйнштейна был совсем другим.

Эйнштейн был твердо убежден, что законы природы должны записываться в виде красивых уравнений. Он считал это совершенно необходимым. Именно поиски красоты составляли основу эйнштейновского метода работы. Согласие с экспериментом не было для него решающим фактором.

Главный вклад, который он внес в науку, составляют специальная теория относительности и общая теория относительности. Я хочу попытаться объяснить, каким образом эти две теории повлияли на развитие нашего мышления.

Специальная теория относительности. Начнем со специальной теории относительности, которую будет легче понять, представив ее себе как некий принцип симметрии. С древних времен считалось очевидным, что пространство обладает двумерной симметрией по отношению к двум горизонтальным направлениям. Однако на самом деле симметрия пространства трехмерна: есть еще и вертикальное направление, симметричное по отношению к двум горизонтальным. Я думаю, что первым, кто эту симметрию понял, был Ньютон. Он показал, что существуют основные законы динамики, симметричные относительно трех пространственных направлений, и кажущееся отличие вертикального направления от двух горизонтальных объясняется единственной причиной — силой, которая притягивает нас к Земле.

Таким образом, примитивная двумерная симметрия превратилась у Ньютона в трехмерную. Эйнштейн же превратил трехмерную симметрию в четырехмерную. Он показал, каким образом временное направление оказывается симметричным по отношению к трем пространственным измерениям.

Надо сказать, что эту симметрию совсем не легко понять, потому что она выходит за рамки геометрии, к которой мы привыкли со

*) Einstein and Development of Physics // Commemoration of Einstein.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1981.— P. 13—23.

времен Евклида, и связана с другой геометрией, в которой скорость света является абсолютной величиной. Однако такую новую геометрию можно построить достаточно просто. Ее основные идеи сформулировал Минковский, и о ней обычно говорят как о пространстве Минковского. Эйнштейн считал, что пространство-время нашего мира обладает именно такой симметрией, и к этому пространству надо относить все физические законы.

Преобразования, соответствующие вращениям в четырехмерном пространстве, были получены еще раньше Лоренцем. Они называются преобразованиями Лоренца. Лоренц вывел их из уравнений Максвелла, описывающих электрические и магнитные поля. Исследуя уравнения Максвелла, Лоренц обнаружил, что их можно некоторым образом преобразовать, но сочтя эти преобразования чисто математическими, не смог понять их фундаментальный физический смысл. Лоренц не увидел четырехмерной симметрии пространства-времени. Понять ее было суждено только Эйнштейну.

Эйнштейн подошел к задаче совершенно по-другому. Он почувствовал, что существует какая-то глубокая причина, заставляющая поверить в четырехмерную симметрию. Это целиком и определило ход его рассуждений.

Пуанкаре также занимался преобразованиями Лоренца и сделал по существу то же, что и Лоренц. Но Пуанкаре смотрел на свою работу как на вытекающую из опыта и так же, как Лоренц, не понял, что имеет дело с новым фундаментальным физическим принципом. Разницу во взглядах Пуанкаре и Лоренца, с одной стороны, и Эйнштейна — с другой, можно увидеть в их совсем разной реакции на экспериментальные результаты.

В 1905 году эти вопросы стали предметом многочисленных обсуждений. Лучшим экспериментатором в то время считался Кауфман. Лоренц разработал модель электрона, которая подчинялась его преобразованиям, а потому согласовывалась и с требуемой Эйнштейном четырехмерной симметрией. Лоренц предложил свою модель электрона взамен предыдущей модели, называемой моделью Абрагама, в которой электрон считался жестким шариком. В 1906 году Кауфман поставил несколько экспериментов, чтобы решить, какая из моделей электрона правильна, и сделал вывод, что правильна модель Абрагама.

Это известие сразу Лоренца напало. «Вся моя работа пошла насмарку», — заявил он *). Пуанкаре воспринял результат Кауфмана как просто накладывающий некоторые ограничения на его схему преобразований. Эйнштейн отреагировал на вывод Кауфмана совершенно иначе.

Эйнштейн считал, что его четырехмерная симметрия настолько красива математически, что она просто должна быть правильной, а если эксперимент этого не подтверждает, то нужно лишь подождать, не обнаружатся ли какие-нибудь неполадки в экспериментах. В общем, Эйнштейн не особенно волновался. Он был внутренне

*) У Лоренца сказано по-французски: «Je suis donc au bout mon latin».

убежден в правильности своей точки зрения, а по отношению к эксперименту занял позицию поживем — увидим.

Через несколько лет эксперименты были повторены, и результаты подтвердили модель Лоренца — Эйнштейна и противоречили модели Абрагама. Спустя еще некоторое время в приборах, с которыми работал Кауфман, обнаружилась неисправность. Так что реакция Эйнштейна оказалась правильной. Для него такое отношение было весьма характерным. Оно связано с большим доверием к фундаментальным идеям, если они опираются на безупречно красивый математический аппарат, чем к экспериментальным результатам. Экспериментаторы всегда переоценивают точность своих данных и склонны совершать ошибки, поэтому не стоит сразу реагировать на их сообщения.

Так возникла специальная теория относительности Эйнштейна. Когда она стала общедоступной, перед физиками встала следующая задача: для всех физических законов найти форму записи, демонстрирующую четырехмерную симметрию между тремя пространственными и одним временным измерениями. Решить такую задачу обычно было не очень сложно, и она выглядела как интересная игра.

Я был тогда молодым студентом и немного спустя тоже включился в эту игру. В те времена было довольно просто сделать хорошую работу и опубликовать статью. Для этого можно было подобрать любое физическое явление, имеющее удовлетворительное объяснение в рамках старых представлений о пространстве и времени, и просто переписать его «в лоб» в терминах новой четырехмерной симметрии.

Мне бы хотелось особенно отметить работу Луи де Бройля. Изучение уравнения Эйнштейна привело де Бройля к постулированию волн, связанных с частицами. Эти волны выглядели совсем как нефизические: они двигались быстрее света. Однако, по Эйнштейну, ничто не может двигаться со скоростью, большей скорости света, и эти волны надо было считать математической выдумкой, не связанной ни с какой физической реальностью.

Де Бройль показал, что если взять групповую скорость этих волн, так сказать, скорость пакета волн, то она будет меньше скорости света и равна скорости частицы. Если потребовалось бы передавать с помощью волн сигнал, то существенной оказалась бы именно групповая скорость. Общее утверждение о том, что ничто не может двигаться быстрее света, должно быть заменено уточненным утверждением: никакой сигнал не может передаваться со скоростью, большей скорости света, и если для передачи сигнала используются волны де Бройля, то вы увидите, что такой сигнал передается не быстрее света. Таким образом, не возникнет никакого противоречия с основной идеей Эйнштейна.

В дальнейшем идею волн де Бройля развивал Шрёдингер, а потом Клейн и Гордон. Оказалось, что они очень важны для объяснения квантовых явлений. Но все же к этим волнам нас привел гений Эйнштейна. Настойчивость, с которой Эйнштейн утверждал важ-

ность четырехмерной симметрии, побудила де Бройля задуматься о волнах, связанных с частицами.

Теория относительности оказалась важной и в другом отношении. С открытием представлений четырехмерной симметрии стало необходимо пересмотреть с этих позиций всю механику. Нужно было внести изменения в механику Ньютона, а эти изменения привели к весьма неожиданным выводам, с которыми пришлось согласиться.

Возьмем, например, энергию частицы. Изменение, необходимое при переходе к «эйнштейновской картине», приводит к общеизвестной формуле $E=mc^2$. Это означает, что с каждой частицей материи связано большое количество энергии. Формула $E=mc^2$ приложима к покоящемуся веществу. Если вещество находится в движении, то формулу следует подправить, записав ее в виде $E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$, где p — импульс частицы, а c , как всегда, — скорость света.

Общая теория относительности. Я хотел бы продолжить рассказ и перейти к общей теории относительности. Вклад Эйнштейна в общую теорию относительности существенно отличается от его вклада в специальную теорию относительности. Над общей теорией относительности Эйнштейн работал в одиночестве. Он не был связан ни с Лоренцем, ни с Пуанкаре; он не пользовался уравнениями, которые до него получили другие. Эйнштейн действовал совершенно самостоятельно: с самого начала ему пришлось выводить собственные уравнения.

Эйнштейн произвел глубокие изменения в мышлении физиков. До общей теории относительности существовали две системы взглядов, обе одинаково возможные в применении к фундаментальным законам Природы. Считалось, что взаимодействие происходит посредством поля или же представляет собой действие на расстоянии (action at a distance). Действие через поле является более передовой точкой зрения в электромагнитной теории, потому что приводит к предсказанию электромагнитных волн. Это, конечно, большое преимущество перед концепцией действия на расстоянии. Однако в общем случае в физике необходимо учитывать еще и гравитацию. Ситуация была совсем непонятной до тех пор, пока Эйнштейн не выдвинул новую теорию гравитации, основанную на полевых представлениях. Действие на расстоянии стало неприемлемым.

Эйнштейн изменил саму идею пространства. До него пространство считали плоским. Новое пространство было наделено кривизной, и кривизна описывала гравитационное поле.

Оказалось, что новая теория великолепно описывает Солнечную систему. В ней возникали те малые эффекты, которыми теория Эйнштейна отличается от теории Ньютона. Эти малые эффекты связаны с движением планет и с отклонением светового луча, проходящего вблизи Солнца. Новая теория была неоднократно проверена.

Вы будете вынуждены принять новую формулу, если модифицируете законы Ньютона так, чтобы они согласовывались с идеями Эйнштейна о симметрии пространства и времени. Новая формула от-

личается тем, что в выражение для энергии входит квадратный корень. Наличие квадратного корня означает, что он может иметь либо положительное, либо отрицательное значение, т. е. общая формула приводит к тому, что энергия частицы может принимать отрицательные значения.

На первый взгляд понять это действительно трудно: никто не сталкивался с отрицательными значениями энергии. Тем не менее математика свидетельствует, что они возможны.

Начнем с того, что это не физическая задача. Ведь можно сказать, что отрицательные энергии не существуют в Природе, поэтому мы с ними и не встречаемся. Так можно было рассуждать в механике, которая к моменту возникновения квантовой теории необычайно развилась. Однако в квантовой теории динамические переменные могут изменяться скачком из одного состояния в другое, и если частица находится вначале в состоянии с положительной энергией, то она может перескочить в состояние с отрицательной энергией. Такие скачки предсказываются квантовой теорией. Можно вычислить и их вероятности. При этих условиях нельзя просто закрывать глаза на отрицательные значения энергии. Так что мы вынуждены рассмотреть их и попытаться найти их физическую интерпретацию. Это оказывается не таким уж сложным делом. Уровни с отрицательной энергией можно интерпретировать в терминах состояний антиматерии. Таким образом, можно сказать, что создание Эйнштейном специальной теории относительности приводит к предсказанию антиматерии. К этому предсказанию ведет непрерывная цепь рассуждений, но главным образом они берут свое начало от основных уравнений механики Эйнштейна, написанных взамен уравнений Ньютона.

Я уже упоминал о задаче, которой в то время занимались физики: записать стандартные физические уравнения в таком виде, чтобы стала видна симметрия пространства и времени, требуемая по теории Эйнштейна. В рамках классической механики эта задача обычно решается без особого труда. Однако ситуация стала совсем другой, когда около 1925 года Гейзенберг и Шрёдингер открыли квантовую механику. Теперь основные уравнения динамики содержали производные по времени. Время входило в них иначе, чем три пространственных измерения. Таким образом, возникла очень серьезная задача: попытаться восстановить четырехмерную симметрию этих уравнений квантовой механики.

Оказалось, что эту задачу можно решить для случая одной частицы, но если во взаимодействии участвуют несколько частиц, то возникают серьезные трудности. Многие пытались найти решение «в лоб», но эти попытки приводили к уравнениям, которые в действительности не имели практического значения: при их решении появлялись бесконечные члены, что, конечно, было бессмысленным.

Я бы сказал, что с задачей приведения в соответствие обычной квантовой механики и четырехмерной теории относительности Эйнштейна пока не удалось справиться. Над этой задачей много трудились, но она все еще не решена, если не считать нескольких простых

случаев, с участием одной частицы. Современные физики проявляют большую изобретательность, пытаются закрыть глаза на бесконечности, которые возникают естественным образом при обычных вычислениях. Мне все же кажется, что такой путь неправилен по своей сути. Работа такого рода наверняка не понравилась бы Эйнштейну.

Правда, произошел прогресс в развитии новой точки зрения на само пространство. Мы уже больше не цепляемся ни за плоское евклидово пространство, ни за его четырехмерную модификацию, введенную Минковским. Наши мысли теперь обращены к искривленному пространству. Получив новую идею, математики могли развивать ее, вводя более сложные типы искривленных пространств.

Сам Эйнштейн понимал, что его пространство на самом деле может оказаться неадекватным, потому что совсем по-разному включает гравитационное поле и поле электромагнитное. Оба эти поля характеризуются дальнедействующими силами, т. е. силами, обратно пропорциональными квадрату расстояния, и поэтому, казалось бы, должны быть тесно связаны друг с другом. Из самой идеи естественно вытекает предположение, что пространство какого-то более общего вида, чем то, с которым работал Эйнштейн, должно описывать и электромагнитное поле. Задача состояла в том, чтобы найти это более общее пространство.

Вскоре Вейль нашел одно из решений: Он очень удачно записал некоторые уравнения, но оказалось, что его решение противоречит квантовой теории, и потому от уравнений Вейля отказались.

Поиск возобновился. С тех пор сильнейшие математики мира пытаются построить пространство, которое описывало бы природу лучше, чем пространство, использованное Эйнштейном. Сам Эйнштейн потратил на эту задачу весь остаток своей жизни, так и не добившись успеха. Построение пространства, которое объединило бы гравитационное и электромагнитное поле, до сих пор остается одной из фундаментальных проблем физики.

Позднее были открыты другие поля, важные для описания взаимодействия между частицами внутри атомного ядра. Эти взаимодействия возникают за счет новых сил и называются сильными и слабыми взаимодействиями. Таким образом, всего в физике известно четыре типа сил, и все их хотелось бы объединить.

Это очень сложная задача, исследованием которой уже очень много занимались, но мне не кажется, что работа в целом идет по правильному пути. Я не одобряю такой путь, потому что при этом все равно сохраняется уже упоминавшаяся мной трудность в достижении согласия хотя бы между специальной теорией относительности и законами квантовой механики.

Индетерминизм. Развитие законов квантовой механики достигло уже очень высокого уровня, и на современном этапе они требуют для своей интерпретации терминов вероятности. Мы не в состоянии вычислить, что может случиться в разных условиях; мы можем лишь рассчитать вероятность, с которой произойдет какое-либо событие.

Физики давно привыкли к вероятностной интерпретации кванто-

вой механики. Большинство физиков она вполне устраивает. Однако Эйнштейн выступал против вероятностной интерпретации. Он был уверен, что основные законы физики должны обладать детерминизмом классической механики.

Такую точку зрения Эйнштейна можно вполне понять, ведь он достиг огромных успехов в модификации пространства. Когда человек добивается очень большого успеха на каком-то пути, он начинает думать, что для решения всех других задач нужно продвигаться все дальше и дальше в том же направлении. И всю оставшуюся жизнь Эйнштейн работал в выбранном им направлении. К стандартной интерпретации квантовой механики он относился враждебно.

Эту стандартную интерпретацию принято называть боровской интерпретацией квантовой механики. Она высоко ценилась школой Бора. Между Бором и Эйнштейном возник серьезный спор, который определил положение в физике с того самого дня, когда около 1927 года квантовая механика была впервые сформулирована в общем виде.

В отношении существа спора мне бы хотелось подчеркнуть, что вы будете вынуждены принять боровскую интерпретацию, если вы используете в работе стандартную квантовую механику. К ней приходится обращаться всем физикам, изучающим реальные задачи. Однако можно с таким же правом считать, что интерпретация Бора — отнюдь не последнее слово в этой полемике.

Такая точка зрения оправдывается явной нелогичностью уравнений стандартной квантовой механики в том смысле, что при попытке применить их к некоторым частным задачам возникают бесконечности. Приходится выучивать правила, которые позволяют закрывать глаза на бесконечности. Люди научились весьма тщательно выполнять эти правила и, не обращая внимания на бесконечности, вычислять оставшиеся члены, достигая в результате очень хорошего согласия с опытом.

Большинство физиков были вполне довольны достигнутой точностью теории, но Эйнштейн не сдавался. Он, конечно, знал об этой точности, но все же считал, что теория неверна в самой основе, а потому выбранный путь не приведет к серьезным успехам в физике.

В этой полемике я скорее склонен согласиться с Эйнштейном. Думаю, что в конце концов Эйнштейн может оказаться правым, однако утверждать этого нельзя до тех пор, пока в нашем распоряжении не появится новая квантовая механика, более совершенная, чем та, что у нас есть сейчас.

* * *

В заключение мне бы хотелось подчеркнуть новую точку зрения, принадлежащую Эйнштейну. Он считал необходимым качеством фундаментальных уравнений присущую им красоту. Эйнштейн впервые высказал эту мысль и больше, чем кто бы то ни было, подчеркивал важность красоты основных уравнений.

Вы, конечно, можете спросить: «Почему уравнения должны обладать необыкновенной красотой?» Я не могу ответить на это определенно. Можно лишь сказать, что этот принцип оказался чрезвычайно успешным. Особенно плодотворен он был в руках Эйнштейна. Нужно просто принять на веру, что Бог именно таким создал мир. Он бросил нам вызов — найти математику, на которой держится физика. Мы должны, конечно, понимать, что задача еще не решена и что все недостатки и неудачи современной теории следует относить на счет ее несовершенства. Необходимо изучить это несовершенство и попытаться от него избавиться.