

СЕДЬМАЯ ЛЕКЦИЯ

(4.III 1934 г.)

Резюме предыдущих лекций. Постановка вопроса Эйнштейном Принцип относительности. Вопрос об эфире. Второй постулат Эйнштейна. Противоречивость обоих постулатов. Теория Ритца. Двойные звезды (де-Ситтер) и другие обоснования второго постулата. Из-за чего возникает противоречие между основными постулатами. Вопрос о структуре физических понятий. Определение длины

Резюмируем коротко предыдущее. Мы говорили об электромагнитных и оптических явлениях в движущихся телах. В чем их интерес? Во-первых, эта обширная область явлений, сама по себе интересная для изучения. Во-вторых, здесь, как думали, выявляется взаимодействие материи с эфиром. Существование эфира не вызывало сомнений, и, исследуя оптические и электромагнитные явления в движущихся телах, надеялись получить представление об этой все же загадочной среде. Наконец, в-третьих, мы экспериментируем на Земле, которая движется в мировом пространстве, движется относительно светил. Возникает вопрос: как происходят оптические и электромагнитные явления на движущихся планетах и как они протекают в межпланетном пространстве?

Мало-помалу накопился большой материал, главным образом о явлениях, имеющих место тогда, когда в поле исследования есть предметы, находящиеся в относительном движении (аберрация, доплер-эффект, увлечение Физо — Френеля, магнитное поле движущихся зарядов, ток Рентгена, опыт Вильсона, вся проблема катодных лучей и динамики электрона и т. д.). Параллельно шла и теоретическая обработка. Но еще до подробной теории все больше укреплялось положение, состоящее — без особой точности — в том, что в системе, движущейся по отношению к неподвижным звездам (например, на Земле), оптические и электромагнитные явления протекают совершенно так же, как если бы вся система покоилась. Общее поступательное движение не сказывается на явлениях. Уже Араго пришел к этому заключению, и все дальнейшее его подкрепляло.

Как я уже сказал, наряду с накоплением опыта шла его теоретическая обработка. В сущности, нельзя разделять опыт и теорию: во всяком опыте всегда заключена теория. Но, говоря о теории, я имею в виду попытку построения общей картины, непротиворечиво охватывающей всю совокупность опытных данных. Только при этом условии мы можем удовлетвориться теорией. Вы знаете, что был целый ряд таких попыток, но до 1905 г. они в общем не

увенчались успехом. При создании такой картины всегда возникал прежде всего вопрос о движении эфира, и в зависимости от решения этого вопроса сама задача ставилась по-иному.

Что касается вопроса об электромагнитных явлениях в неподвижных телах, то со времени Максвелла он был однозначно решен. Надо было обобщить теорию на явления, происходящие в движущихся телах. И вот в зависимости от того, считать ли эфир увлекаемым или неувлекаемым, напрашивается то или другое обобщение. Герц, стремясь объяснить независимость электромагнитных явлений от движения системы, попробовал считать эфир полностью увлекаемым. Независимости явлений от движения всей системы он достиг, но в целом попытка не удалась: его теория не объясняла опытов с относительным движением тел, для которых, собственно, она и была создана. Кроме того, принципиальные трудности в вопросе о вакууме и явлениях в очень разреженных телах также вынуждали оставить теорию Герца.

Тогда выступил на сцену Лоренц, который заявил: эфир неподвижен, раз и навсегда. Как же обстоит дело, если, исходя отсюда, строить теорию так, как ее строил Лоренц?

Приняв неподвижный эфир, он отказался от принципа относительности, так как в системе, движущейся через эфир (например, на Земле), явления протекают иначе, чем в системе, связанной с эфиром. Каковы же были результаты его теории? С точностью тогдашних опытов (первый порядок относительно w/c) все объяснялось удивительно хорошо и качественно, и количественно. Утверждение, что общее движение системы не сказывается на явлениях, — это отрицательное утверждение, а, значит, опыт может лишь показать, что с такой-то точностью это верно. Большинство опытов, которые были сделаны в первое время, могли быть произведены лишь с точностью до w/c , да и то ряд мыслимых опытов не был сделан. Но Лоренцу, так сказать в виде бесплатного приложения, удалось показать, что во всех фактически сделанных опытах первого порядка влияния не должно быть и теоретически. Это было как бы «случайное» следствие его теории, вообще не удовлетворявшей принципу относительности. Но «практическому принципу относительности» (понимая под этим фактическую сумму опытов и их фактическую точность) его теория удовлетворяла.

Впрочем, хронологически это не совсем так, ибо уже был опыт второго порядка (опыт Майкельсона), в котором теория Лоренца оказалась несостоятельной: вопреки теории он говорил, что влияния нет. По теории не должна оказываться несостоятельной ни в одном случае, и поэтому опыт Майкельсона дал теории Лоренца в известном смысле смертельный толчок, укрепляя ту мысль, что принцип относительности больше, чем первое приближение,

и, во всяком случае, выполнен и во втором приближении. Об этом же говорил и опыт Трутона и Нобля. Таким образом, получалось, что принцип относительности действительно есть закон природы и теория Лоренца должна быть оставлена.

Какой же вывод был сделан? Стали думать о том, как видоизменить теорию Лоренца, чтобы охватить и заложенное в ней отрицание принципа относительности, и результаты опытов второго порядка. Вы знаете, что выход указали Лоренц и Фитцджеральд, выдвинув гипотезу сокращения.

Возьмем опыт Майкельсона. Земля движется со скоростью w . Время прохождения света вдоль w есть $t_2 = \frac{2l}{c(1-\beta^2)}$, а время прохождения поперек w есть $t_1 = \frac{2l}{c\sqrt{1-\beta^2}}$. Лоренц предполагает, что длина плеча в направлении w уменьшается: $l' = l\sqrt{1-\beta^2}$. Тогда вместо t_2 будет $t_2' = \frac{2l}{c\sqrt{1-\beta^2}} = t_1$. Это не удовлетворяет принципу относительности, так как не меняется лишь разность времен пробега (само же время пробега зависит от движения), однако опыт Майкельсона объясняется.

Конечно, в этой гипотезе много неудовлетворительного, она специально выдумана, но Лоренцу удалось кое-что сделать в направлении ее обоснования.

Что значит, что стержень имеет определенную длину? Это значит, что все частицы находятся в определенных положениях равновесия. Лоренц показал, что при движении относительно эфира электромагнитные силы меняются так, что система в новом равновесии сокращена именно $\sqrt{1-\beta^2}$ раз. Но, во-первых, было известно, что одни лишь электрические силы не дают устойчивого равновесия, а во-вторых, частицы всегда движутся (тепловое движение), так что все это было хорошо, но надлежащего объяснения не давало. Лоренц попробовал органически соединить сокращение со своей теорией и предположил для этого, что электроны сплюсциваются при движении и что неэлектромагнитные силы также меняются при движении по тому же закону. Хотя все это и объясняет опыты второго порядка, но слишком все искусственно, принцип же относительности не удовлетворен.

Наряду с этими физическими исследованиями причин сокращения Лоренц сделал математическое открытие: он показал, что уравнения Максвелла (по крайней мере в вакууме), которые при переходе к движущимся осям меняют вид (и тем самым показывают, что независимости от движения нет), остаются инвариантными для некоторого специального преобразования координат, времени и полей, для так называемого лоренцова преобразования. В среде вид уравнений несколько меняется. Этот недостаток ис-

правил Пуанкаре в 1905 г. Он высказал мысль, что надо положить в основу как принцип инвариантность уравнений. Он показал, что лоренцово преобразование, если его несколько иначе истолковать, дает инвариантность и там, где есть материя, но для этого нужно иначе складывать скорости. Надо сказать, что уже в 1900 г. Лармор набрел на лоренцово преобразование; но ни Лармор, ни Лоренц, ни Пуанкаре не считали его физическим преобразованием, а видели в нем только формальный математический прием.

Я уже указал, что лоренцова теория сумела объединить все явления, включая опыты Майкельсона и Трутона — Нобля. Правда, чувство исследователя не было удовлетворено. Принципиальное отрицание принципа относительности шло вразрез с инстинктом, и я лично уверен, что даже вне майкельсоновского опыта почва к признанию принципа относительности была подготовлена. Но как бы там ни было, на майкельсоновском опыте особенно ясно обнаружилась несостоятельность теории неподвижного эфира.

Вот как обстояло дело: громадный материал и невозможность создать общую картину без специально выдуманных гипотез. Правда, в 1905 г. именно благодаря работам Пуанкаре, Лармора, Лоренца и других намечалось проникновение, так сказать, в интимную структуру тел, которое обещало разъяснить положение, но тут появилась знаменитая работа Эйнштейна, которая известным образом поставила все на голову.

Грубо говоря, Эйнштейн сказал: «Вы напрасно хлопочете. В сущности вы хлопочете над очень простыми вещами и сами себе создаете трудности». Нам не стоит вдаваться в то, как далеко зашли Лармор, Лоренц и Пуанкаре, так как постановка вопроса Эйнштейном гораздо яснее и удовлетворительнее. Кроме того, это всегда показатель плодотворности теории — она очень эвристична: на основе постулатов Эйнштейна имеется возможность предсказывать новые явления, и все, что известно сейчас, оправдывает эти предсказания. До Эйнштейна надо было *ad hoc* придумывать гипотезы. Из теории Эйнштейна, наоборот, вытекают подтверждающиеся на опыте следствия.

Исторически может быть интересно, что работа Лоренца с его преобразованием вышла в 1904 г., затем 5 июня 1905 г. в «Comptes Rendus» появилась работа Пуанкаре, а в сентябре в «Annalen der Physik» — работа Эйнштейна (30 июня была сдана в редакцию). Эйнштейн не знал ни работы Лоренца, ни работы Пуанкаре, но, мне кажется, нет никакого сомнения, что попал в цель все-таки Эйнштейн. Мы приступим теперь к постановке вопроса Эйнштейном, не следуя хронологически, шаг за шагом, но в основных чертах ее развития.

Эйнштейн ставит себе задачей выделить из накопившегося материала бесспорные положения и, исходя из них, посмотреть, к чему они приведут. Эти положения, которые вытекают из всего материала, которые, так сказать, навязаны нам этим материалом, надо положить в основу теории, т. е. надо последовательно их придерживаться и уже на них строить дальше. Такой основой у Лоренца был неподвижный эфир и справедливость в нем максвелл-лоренцовых уравнений. Эйнштейн не старается приспособить эту картину. Вернее, он с ней порывает.

Как первый постулат Эйнштейн выставляет положение: неускоренное движение системы как целого не влияет на законы любых явлений, происходящих в этой системе (ни механических, ни электромагнитных, ни оптических). Для механических явлений это было известно в форме инвариантности уравнений Ньютона при преобразовании Галилея. Трудность была в отсутствии такой инвариантности для электромагнитных уравнений.

Уточним: существует ∞^3 систем отсчета (семейство с тремя параметрами, если отвлечься от поворотов координатных осей и произвола в выборе начала отсчета координат и времени), движущихся друг относительно друга неускоренно, и во всех этих системах явления протекают совершенно одинаково — нет выделенной системы. Не в двух *любых*, а именно *во всем этом классе систем, включающем систему неподвижных звезд*. Мы говорим: есть некоторая система, отнесенная к центру масс неподвижных звезд, и все системы, движущиеся по отношению к ней неускоренно, полностью с ней равноправны. Если же вы возьмете вращающуюся систему и систему, движущуюся по отношению к ней равномерно и прямолинейно, то в них явления не будут протекать одинаково.

Здесь нужно еще одно пояснение. Конечно, явления одни и те же, если условия одни и те же. Если я в одной системе экспериментирую с неподвижной водой, то те же явления получатся в другой системе, если вода неподвижна в ней. При каких же условиях можно назвать системы одинаковыми в отношении состояния материальных тел? Эйнштейн говорит, что для ответа надо учитывать лишь *весомые тела*. А если мы имеем вакуум? Тогда, говорит Эйнштейн, явления всегда одинаковы, вакуум не принимается во внимание, независимо от того, движется система или нет. Если есть две неускоренно движущиеся друг относительно друга системы и в обеих пустота, то явления будут одинаковы. Но ведь имеется эфир? «Я эфира не знаю, — говорит Эйнштейн, — я могу решить, движутся ли *тела* друг относительно друга; движется ли *эфир*, такого вопроса решить нельзя». Это он выставляет как постулат.

Итак, Герц говорил — эфир увлекается, Лоренц говорил — покоится, Эйнштейн говорит — эфира нет. В тождестве двух систем тел, движущихся одна относительно другой, уже заложено то, что мы не можем говорить об эфире.

Когда вообще имеет смысл говорить об эфире? В механических теориях света это имело смысл. Эфир был средой, со всеми свойствами реальных сред. С появлением электромагнитной теории света механическое толкование эфира сделалось тормозом, направляя внимание и усилия на модели, состоящие из шестеренок. Да и принципиально это было неверно, ибо выяснилось все больше, что в основе механических свойств тел лежат их электромагнитные свойства, а тогда не имеет смысла опять сводить электромагнитные явления на механические модели. Но с точки зрения Лоренца или Герца все же можно было говорить об эфире. Он был лишен механических свойств и понимался как носитель электромагнитных полей. Но одно свойство он сохранил: и у Лоренца и у Герца он мог быть локализован по отношению к определенной системе. Эйнштейн говорит, что и это свойство отпадает. Можно говорить об эфире, но тогда мы должны примириться с тем, что он покоится во всякой системе (по крайней мере из нашего класса систем), т. е. он лишается последнего свойства, которое позволяло называть его средой, — свойства локализации. Можно называть эфиром пустоту, но это лишено интереса: имеет смысл говорить об эфире лишь постольку, поскольку о нем можно что-нибудь спросить. Но о нем нечего спрашивать. Для физика, стоящего на точке зрения Эйнштейна, понятие эфира теряет смысл.

Но тогда можно, казалось бы, сказать и другое: если эфира нет, то вообще принцип относительности сам собой понятен. Пусть мы находимся в вакууме и эфира нет. В двух системах воспроизведены одни и те же условия, и, поскольку эфира нет, эти системы вообще ничем не различаются. Ведь различие раньше было только в движении эфира по отношению к ним. Если хотите, это так. Но такое понимание принципа относительности для физика не имело бы смысла. В формулировке же Эйнштейна он отнюдь не сам собой понятен.

Пусть имеется два мира: один весь покоится, другой весь движется со всеми звездами, планетами и т. д. Если бы так формулировать принцип относительности, т. е. имеются два мира, которые полностью движутся друг относительно друга и в обоих все совершенно одинаково, то это, может быть, и само собой понятно. Но такое утверждение нельзя проверить на опыте, и потому оно неинтересно. Эйнштейн говорит другое: если есть замкнутая система тел и она один раз покоится по отношению к звездам, а другой раз движется, то все будет происходить в ней одинаково, хотя условия не полностью одинаковы, условия различны по от-

ношению к очень удаленным телам. Это уже не самоочевидно. Другими словами, Эйнштейн утверждает, что можно выделить замкнутые (частичные) системы, причем любое неускоренное движение такой частичной системы как целого не влияет на происходящие в ней явления. Если движение ускорено, то это уже не так (например вращение). Никто, однако, не доказал, что ничего не изменится, если вращается как целое вся Вселенная. Когда говорят, что принцип относительности неверен для вращения, то имеют в виду вращение *замкнутой системы*. Вращается ли она или нет по отношению к неподвижным звездам — это вносит разницу, а движется ли она без ускорения или покоится — не вносит. Значит, принцип относительности имеет физический смысл для замкнутой системы. Если бы я постулировал его для мира в целом, то, как сказано, он не имел бы никакого практического, а значит, и физического применения. Он приобретает интерес лишь тогда, когда можно выделить замкнутую систему, для которой он верен. Этот постулат Эйнштейна, который, как он утверждает, осуществляется в природе, не сам собой понятен. Он верен для неускоренного движения, и только. Вопрос о вращении — это вопрос общей теории относительности. Специальная теория относительности рассматривает лишь определенный тип движений — движения неускоренные. Итак, первый постулат Эйнштейна — утверждение правильности принципа относительности в указанном смысле.

Название «принцип относительности» — одно из самых неудачных. Утверждается независимость явлений от неускоренного движения замкнутой системы. То, что это называется «принципом относительности», вводит, как увидим потом, в заблуждение.

Второй постулат Эйнштейна заключается в следующем. Громадный опыт подтверждал правильность концепции Максвелла, которая вообще противоположна концепции классической механики, где есть лишь отдельные конечные тела. Вопрос о *поле* был посторонним в классической механике, понятие поля было чисто математическим. Но в электромагнитных явлениях понятие поля, близкоедействие, передача сил от точки к точке — эта концепция основная, и она подтверждалась всем опытом. Точное определение понятия поля заключается в том, что процессы описываются при помощи некоторых величин, удовлетворяющих дифференциальным уравнениям в *частных* производных. Уравнения Максвелла для неподвижной (или для *медленно* движущейся) среды правильны, а из них следует конечная скорость распространения электромагнитных возмущений в пустоте независимо от формы возмущения и независимо от движения источника. Именно в близкоедействии и заложена эта независимость. И вот

этот простой факт, подтверждаемый всем материалом, Эйнштейн берет в качестве постулата. Он не знает пока никаких уравнений Максвелла, никакой электродинамики, а только то положение, что скорость света и вообще всякого электромагнитного возмущения не зависит от скорости источника. Это второй постулат Эйнштейна.

Мы все согласны с тем, что оба эти постулата навязаны нам всей картиной, набросанной в прошлых лекциях. Почему же всякому не приходило в голову сказать: давайте их придерживаться и на них строить? Потому, что эти постулаты на первый взгляд (а до Эйнштейна и вообще) казались взаимно противоречивыми.

Естественно поэтому, что, когда Эйнштейн их высказал и они привели к противоречию с тем, что считалось истинным и непреложным, возник вопрос: правильно ли он извлек существенные моменты, которые следует считать постулатами? Может быть, эти положения неверны? Вопрос коснулся именно второго постулата, так как справедливость принципа относительности уже не вызывала сомнений.

И вот тогда Ритц заявил, что он считает второй постулат неверным. Правда, он соответствует духу всей теории поля, но экспериментально он ничем не подтвержден. Он вытекает из уравнений Максвелла, но возможно, что они неверны, и Ритц высказывает гипотезу, что второй постулат неверен. В то время действительно не было прямых экспериментальных доказательств второго постулата, и Ритц был прав, указывая на такую возможность. Мы разберем это и увидим, что в настоящее время имеется достаточно доказательств правильности второго постулата.

Я хотел бы только еще раз подчеркнуть, что Эйнштейн вовсе не стремился придумать теорию относительности в порядке игры ума, как нечто с неба свалившееся. Он действительно стремился выяснить, что является неоспоримым в громадном материале, и ему не оставалось ничего другого, как отсортировать эти два постулата. Поэтому на его теорию нужно смотреть как на единственный исход, который позволил объединить все. И если сразу не назвали эти два принципа, то именно в силу их противоречивости. Чрезвычайная смелость Эйнштейна в том и заключалась, что он этого кажущегося противоречия не испугался.

Почему эти два принципа противоречивы? Достаточно одного примера. Пусть имеем две системы A и B , из которых одна движется прямолинейно и равномерно (пусть B). В некоторый момент наблюдатели A и B находятся друг против друга, и тогда A производит короткую световую вспышку. Через некоторое время сигнал в системе A (неподвижной относительно звезд) будет на поверхности шара радиуса $r = ct$ (рис. 34). Одновременно сигналом будут затронуты все точки на поверхности этого шара. Но в тот

же момент сигнал вышел и для B . Так как справедлив принцип относительности, то наблюдатель B также должен видеть, что через время t сигнал занимает шаровую поверхность радиуса $r = ct$. Но по второму постулату движение источника не должно играть роли. Следовательно, B увидит, что центр сферы находится около него самого, т. е. там, откуда вышел сигнал. Значит, A говорит, что сигнал одновременно захватывает поверхность шара с центром возле него, а B говорит то же, но центр находится возле него, и это должен быть один и тот же шар. Мы приходим к вещи как будто бы невозможной.

Тот же опыт в механике: из точки A во все стороны вылетают осколки гранаты с одинаковой скоростью. Через некоторое время они будут на поверхности шара с центром в A как с точки зрения системы A , так и с точки зрения B . Здесь принцип относительности также верен, но нельзя требовать, чтобы оба наблюдателя видели одну и ту же картину, так как граната покоилась в A , но двигалась в B . Движение гранаты сказывается на скорости полета осколков, т. е. нет независимости скорости движения частиц от источника, значит, нет и противоречия.

Вот почему оба принципа, несмотря на их убедительность и простоту, не были высказаны раньше. Вот почему Ритц ополчился против второго. Ведь достаточно принять, что скорость

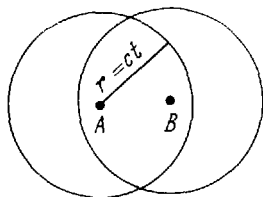


Рис. 34

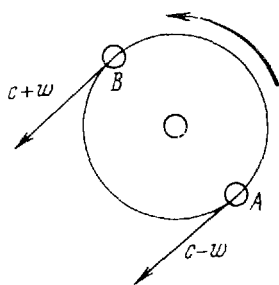


Рис. 35

света зависит, как и в механике, от скорости источника, чтобы полностью удовлетворить принципу относительности и сохранить преобразование Галилея. Ритц при этом сознательно отвергает уравнение Максвелла.

Существует очень интересная полемика Ритца с Эйнштейном, которая идет, в сущности, глубже. Ритц говорит, что вообще максвелловские уравнения таят в себе известную несообразность: они допускают такие решения, которые, по его мнению, не имеют физического истолкования. Он думает, что эти уравнения дают

слишком много: не только то, что можно наблюдать, но и то, чего наблюдать нельзя. Ритц говорит: непосредственно никто не может сказать, зависит ли скорость света от движения источника, а из совокупности всех опытов этого заключить нельзя. То, что в то время такие опыты уже были, на это никто не обращал внимания. На них в 1913 г. указал де-Ситтер.

Речь идет о двойных звездах. По эффекту Доплера астрономы могут судить об орбитах двойных звезд. Если бы зависимость скорости света от скорости звезды существовала, то это сразу же сказалось бы на наблюдаемых явлениях. Конечно, $w \ll c$, но расстояния огромны и времена прихода света к нам будут очень сильно различаться: звезда послала свет из A , потом пришла в B , и хотя в B она позже, но из B свет идет скорее, и мы могли бы увидеть B и A сразу или даже B раньше A . Во всяком случае, мы увидели бы не так, как оно происходит на орбите. Однако орбиты получаются совершенно правильные, и расчет дает, что если и есть зависимость, то, во всяком случае, меньше 0,002 (т. е. если скорость равна $c + kw$, то $k < 0,002$; отрицательное утверждение, конечно, никогда нельзя доказать полностью). Это прямое доказательство было опротестовано Роза, который заявил, что де-Ситтер недостаточно хорошо подсчитал, не учел всех моментов. Теперь можно уверенно сказать, что Роза ошибся.

Можно привести и гораздо более простые соображения, говорящие за постулат Эйнштейна. Возьмем отражение и преломление. На тело падает волна. Почему она отражается? Потому что в теле имеются движущиеся электроны, которые испускают вторичные волны. Если бы скорость этих волн зависела от движения частиц, то они были бы некогерентны между собой и ничего не получилось бы из известных нам явлений отражения и преломления. Конечно, это не доказательство второго постулата, поскольку принимается правильной вся картина преломления и отражения путем вторичного излучения, но все же это аргумент в его пользу¹.

Наконец, опыт Майкельсона объясняется, по Ритцу, тотчас же, если источник движется вместе с прибором, но если в качестве источника взять звезду, то опыт должен был бы дать положительный результат. Томашек в 1926 г. так и сделал, но получил отрицательный результат. В итоге второй постулат нужно признать правильным.

Итак, мы имеем два постулата, на первый взгляд противоречивых, в силу чего их и нельзя было сразу признать.

¹ Опыт Физо объясняется в теории Ритца с большой натяжкой. См. *Pauli*, стр. 550.

Но спросим себя теперь: что означает это противоречие? В опыте Майкельсона я наблюдаю принцип относительности, а в опыте де-Ситтера наблюдаю независимость скорости света от движения источника. В том, что я это *наблюдаю*, противоречия нет. Оно наступает в *рассуждениях*. Я определил скорость света, когда я покоюсь. Затем я определил ее, когда я движусь. Если я это действительно сделал и получил одинаковый результат, то в самих фактах противоречия нет. Оно получается тогда, когда говорят: двигаясь, ты не мог определить скорость света как c , двигаясь, ты *должен* был получить $c - w$. Вот в этом рассуждении о том, что *должно* быть измерено, и скрыто противоречие с результатом наблюдений. Не опыты противоречивы, а они становятся такими, потому что вы привносите рассуждение, которому вы абсолютно доверяете. Рассуждение относится к тому, что называется сложением скоростей, оно относится к тому, что если покоящийся человек видел сигнал на поверхности шара, то одновременно другой, движущийся человек *не мог* видеть этот же сигнал на поверхности шара; в том, что *не мог видеть*, а не в том, что видел, заключено противоречие.

Эйнштейн говорит: откуда вы знаете, что преобразование Галилея, т. е. выражаемые им пространственно-временные соотношения, правильно? Он выкристаллизовал то звено, где кроется противоречие, это звено оказалось шире, чем все, о чем мы до сих пор говорили. Дело касается не оптики и не механики, а более глубоких вещей — пространственно-временных соотношений. Это и придало теории Эйнштейна ее значение. Речь зашла о наших пространственно-временных представлениях, о том, что казалось само собой понятным, что казалось «святая святых», чего трогать нельзя, на чем зиждется все естествознание, все наше понимание явлений. И вот сюда Эйнштейн «положил палец».

Нам нужно посмотреть, таким образом, действительно ли правильны те соотношения, которые формулируются галилеевским преобразованием. Для этого надо начать издалека, так как я считаю, что здесь самый гвоздь принципа относительности, что именно здесь большей частью сосредоточено непонимание вопроса, что отрицательно относящиеся к теории относительности не понимают самого подхода.

Итак, наша цель — совместить эти два, казалось бы, противоречивых постулата, показать, что наше рассуждение, приводящее к противоречию, неверно, показать, почему оно неправильно, и заменить его более правильным. Чтобы это сделать, нужно начать с другого принципиального вопроса — вопроса о структуре понятий, с которыми работает физик¹. Я не могу говорить об

¹ [Говоря о физических понятиях, Л. И. Мандельштам здесь и всюду далее имеет в виду количественные понятия, т. е. физические величины.]

этом в полном объеме, во-первых, потому, что я не специалист и недостаточно знаю эти вопросы; во-вторых, они нас завели бы слишком далеко в сторону. Но некоторые характерные черты, без которых физик не может работать, нужно усвоить. Мы увидим, что мы говорили массу слов, вообще лишенных содержания, а отсюда и получились все недоразумения. Покажем это на самых простых примерах.

Когда мы говорим, например, о ньютоновых или каких-нибудь других законах, то мы имеем формулы, в которые входят x , y , z . Мы проверяем эти формулы, подставляя вместо x , y , z определенные числа. Для этого надо уметь измерять длину.

Что значит для физика измерить длину? Во-первых, надо иметь единицу. Что такое единица длины? Это расстояние между штрихами на стержне, находящемся в Париже, которое называется метром. Можно ли спросить, действительно ли это метр или нет? Нет, нельзя: это по *определению* — метр. В этом сказывается чрезвычайно существенная черта понятий, с которыми оперирует физик. Вообще в логике определить понятие — это значит свести сложное понятие на более простое, т. е. уже известное (не знаю, можно ли это провести до конца). Физик же требует другого: представь реальную вещь. Только так вы свяжете ваше понятие с реальным миром. Нет другого способа определить единицу длины, как показать стержень или другую реальную вещь. Можно сказать: метр — это одна сорокамиллионная земного меридиана. Хорошо, но тогда предмет, который вы предъявляете, — Земля. Вы не можете описать предмет, вы должны его показать; другого способа нет.

Но это не все. Если есть единица, то надо уметь измерять. Я хочу измерить длину стержня. Я укладываю метр. Пусть он уложился 5 раз, тогда я говорю: длина стержня 5 метров. Верно это или нет? Вопрос лишен смысла: это по *определению* так. Если я перенес метр 5 раз, то я говорю, что длина 5 метров. Вы можете сказать, что при переносе стержень мог измениться. Это заявление, взятое само по себе, тоже бессмысленно. Оно имело бы смысл, если бы вы указали, по отношению к чему метр изменился. Тогда я этот другой, «неизменный» стержень возьму за единицу. Мы указали, кроме того, *реальный процесс*, который дает нужное нам число — по определению длину стержня. Этот процесс заключается в перекладывании масштаба. Физик должен иметь «рецепт», как находить длину. Он должен такой рецепт указать, он его не узнает, а определяет. Из непонимания этого вытекают, между прочим, все недоразумения.

В связи с этим мне вспоминается анекдот, который, конечно, никакого прямого отношения сюда не имеет, но, может быть, несколько пояснит мою мысль. Астроном объяснял экскурсии

законы Кеплера, показывал фазы Венеры и т. д. Один из участников, благодаря его, заявил: «Вы очень хорошо объясняли, и я все понял, но вот не понял, откуда вы узнали, что ее зовут Венера?» *Узнать* этого нельзя, можно *назвать*. Я тоже не узнал, что такое длина, а я определил, что я назову длиной. Но есть разница: если не Венерой, то называйте как угодно. Определение же длины не может быть вполне произвольным, а должно удовлетворять известным требованиям. Каким?

Смерив ширину шкафа *здесь*, вы находите 1 метр и говорите, что, перенеся шкаф *туда*, вы сможете пронести его через дверь. Откуда вы это знаете? Я убежден, что мой стержень, который я называю метром, если он совпадает с чем-либо *здесь*, то будет совпадать и *там*. Мое определение длины осталось бы правильно и в том случае, если при переносе результат измерения менялся бы. Могло бы быть так, что если я припосу палку прямо в аудиторию, то она совпадет с метром, а если обнесу кругом, то не совпадет. В этом случае обе длины правильны, но «рецепт»¹ неоднозначен, непрактичен.

Таким образом, определение равенства двух удаленных отрезков заключает в себе известный рецепт, но оно оправданно, ибо реальные тела, с которыми я оперирую и которые я называю твердыми (например сталь), обладают соответствующими свойствами. Свойства эти таковы, что если два тела совпадают в одном месте, то они совпадут и в другом, и если я одно тело буду сначала обносить кругом, то оно и потом будет совпадать, если совпадало раньше. Я должен иметь такое твердое тело, тело с такими свойствами, чтобы мое определение длины было рационально. Значит, природа не навязывает определений однозначно, но она и не позволяет давать любые определения. Вернее, позволяет, но если я буду определять совершенно произвольно, то я ничего не смогу сделать дальше. Если я хочу строить дальше, то я должен определять, оставаясь в известных рамках.

Я мог бы определить так: если метр укладывается 1 раз, то длина равна 1, если 2 раза, то длина равна 1,5. Запретить так определять нельзя, но это чрезвычайно нецелесообразно: законы Ньютона и вообще все законы были бы совсем другими, было бы много несообразностей и т. д.

Итак, определение основных понятий заключается в том, что я предъявляю определенный предмет, даю определенный процесс и этим предметом и процессом определяю понятие¹, определяю, что я называю длиной и ее измерением. Давая эти определения, я руководжусь требованием однозначности и я выбираю такие

¹[См. примечание на стр. 164.]

тела и процессы, которые ее гарантируют. Гарантируют или нет, это уже вопрос опыта.

Вот что физик называет длиной, вот как он находит те числа, которые подставляет потом вместо x , y , z в свои формулы. Если этих рецептов не дать, то формулы станут пустыми, ничего не значащими, физику с ними нечего делать.

Теперь перейдем к времени. Понятие времени t также опирается на определение, базирующееся на предъявлении какого-либо реального процесса. Обычно в качестве часов предъявляется вращение Земли, т. е. считают равными времена, соответствующие равным углам поворота Земли. Это определение. Нельзя спросить: действительно ли Земля в равные времена поворачивается на равные углы? Мы так определили равные времена. Конечно, на деле определение t по вращению Земли делается несколько сложнее, но принципиально положение именно таково: предъявляется Земля и постулируется, что известным углам ее поворота соответствуют такие-то времена. Характер определения остается в силе.

Если такое определение дано, то *узнавать*, вращается ли Земля равномерно или нет, — кажущаяся задача. Этого нельзя сделать, ибо время определено из движения Земли. Что же тогда дают законы Ньютона? Они говорят: если вы определили время, т. е. в любой момент можете найти число t , то вы будете знать, какой функцией от t будут выражаться, например, качания маятника. Т. е. прежде всего нужно определить время, и лишь тогда законы Ньютона приобретают содержание.

Возможен другой способ: считать законы Ньютона справедливыми и определять время из них. Например, в качестве часов предъявляется движение тела по инерции и постулируется, что равным отрезкам пути соответствуют равные времена. Но тогда уже теряет смысл проверка того, является ли движение этого тела равномерным.

Таким образом, в принципе дело не меняется: либо определение времени дается через движение Земли и на опыте находится закон инерции, либо, наоборот, в основу определения кладется закон инерции и с его помощью исследуется движение Земли. Можно, конечно, избрать и какой-либо иной процесс для определения времени t , но, во всяком случае, какой-то реальный процесс указать для этого необходимо.

Непосвященному кажется на первый взгляд, что можно непосредственно узнать гораздо больше, чем это возможно на самом деле. Целый ряд понятий не познается, а *определяется для познания* природы. Эйнштейн показал, что именно этот момент был упущен из виду, и в этом его главная заслуга. Если мы говорим: скорость, одновременность и т. д., то это все пустые слова, пока мы не определили, что они значат. Думали, что в вопросе

об одновременности можно непосредственно сказать, что это такое, а между тем здесь также нужно сначала определить это понятие. До Эйнштейна каждый давал бессознательно свое определение, причем один раз — одно, другой раз — другое. В следующий раз мы и разберем этот вопрос.

ВОСЬМАЯ ЛЕКЦИЯ

(10 III 1934 г.)

Краткое резюме. Вопрос о совпадении разных определений. Одновременность удаленных событий, дискуссия вопроса Эйнштейновское определение одновременности. Критика возражений против него Устранение противоречия между основными постулатами, относительность одновременности О различных определениях одновременности

Резюмирую в двух словах сказанное. На основе всего громадного материала, относящегося к электромагнитным и оптическим явлениям в движущихся телах, Эйнштейн пришел к убеждению, что два положения нужно считать правильными: 1) *принцип относительности*, т. е. признание того, что во всех галилеевых системах координат (галилеевыми системами мы называем класс систем, движущихся друг относительно друга прямолинейно и равномерно) все электромагнитные и оптические явления протекают одинаково. Это именно тот класс систем, в которых, как известно, протекают одинаково механические явления, и в этом смысле Эйнштейн распространил принцип относительности механики на оптические и электромагнитные явления, 2) *независимость скорости света от движения источника*.

Анализируя на основе этих двух постулатов (Эйнштейн выдвигает эти два положения в качестве постулатов) весьма простое явление, а именно распространение мгновенного электромагнитного или светового импульса, выходящего из одной точки, мы пришли к кажущемуся противоречию. При этом анализе мы пользовались пространственно-временными соотношениями, которые дают нам возможность пересчитывать явления из одной системы в другую и которые мы считали само собой понятными. С введением этого звена и получалось противоречие, о котором мы говорили.