

СЕМИНАР  
ПО ОТДЕЛЬНЫМ ФИЗИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ  
(1938—1939 гг.)

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ ЛЕКЦИЯ К СЕМИНАРУ 1938/1939 г.

(19.XI 1933 г.)<sup>1</sup>

Я хотел бы коротко очертить тематику семинара и ее мотивировать. Нечего говорить, это все хорошо знают, насколько велики сдвиги, происшедшие в физическом мировоззрении за последние 25 лет. Эти сдвиги вылились в два учения: с одной стороны, специальную и общую теорию относительности, с другой стороны, квантовую теорию.

Первый вопрос, который здесь, естественно, возникает, состоит в том, каково же соотношение между новыми воззрениями и классической физикой. Конечно, здесь нет двух соперничающих физических систем. Положение не таково. Новые теории претендуют на то, что именно они правильно описывают явления. Однако это не значит, что классика потеряла свое значение. Дело в том, что новые теории — это не спекуляция, не выдумка досужих людей, а теории, которые выросли из потребностей опыта. С другой стороны, и классическая физика выросла из фактов, и если она долгое время нас удовлетворяла, то это не могло быть случайностью.

Вы, конечно, знаете, каково действительное положение вещей. Современная физика признает компетенцию классики, но, говоря

<sup>1</sup> [Семинар 1938/39 учебного года был посвящен отдельным физическим вопросам, выбор которых мотивирован в помещенной здесь вступительной лекции Л. И. Мандельштама. На семинаре были сделаны доклады: 1) О поле электрона, движущегося в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде, и об эффекте Черенкова (И. Е. Тамм). В этом докладе были рассмотрены также соответствующие задачи об излучении быстро движущихся тел в акустическом случае и в случае волн на поверхности жидкости; 2) Об эффекте Доплера; 3) О чисто механическом обосновании закона эквивалентности массы и энергии и о выводе лоренцова преобразования на основе этого закона и принципа относительности (студент Г. Друкарев). К этому докладу Л. И. Мандельштам сделал несколько дополнительных замечаний; это выступление также помещено ниже. Обработка вводной лекции и указанного выступления выполнена С. М. Рытовым по собственным запискам.]

схематически, ограничивает ее в двух направлениях: требованием скоростей, гораздо меньших  $c$  — скорости света в пустоте, и требованием достаточно больших масс, размеров и т. п. Классическая физика развивалась на макроскопическом опыте и переносила свои закономерности в микрокосмос. Современная физика считает, что этого как раз и нельзя делать.

Таким образом, классика выступает сегодня как предельный случай новых, более общих теорий. Но когда, где и как происходит переход?

В современных курсах все это излагается, но, естественно, при изложении стараются придать теории общий, логически законченный вид и тем самым указывают на предельный переход к классическим законам в очень общей и абстрактной форме. Поэтому, хотя предельные переходы известны и ясны, но не всегда достигается ощущение этих вещей, не всегда достигается и чувство необходимости новых воззрений. Между тем знать и овладеть — это разные вещи. Поэтому мне казалось желательным выбрать несколько по возможности фундаментальных, но вместе с тем и возможно более простых и цельных вопросов и на них показать, как и почему с необходимостью происходит переход к новым воззрениям, тут же подкрепив теоретическое рассмотрение соответствующими экспериментальными фактами. Это составит первый раздел семинара.

Какие же именно вопросы войдут в этот раздел? Я остановился на трех действительно фундаментальных (частью не только для теории, но и для эксперимента) вопросах.

Первая тема, правда, несколько нарушает изложенный план, ибо в ней речь будет идти о явлениях, теория которых во всех существенных чертах ясна и достаточно точна уже с классической точки зрения.

Когда господствовала лоренцова теория электромагнетизма, ставился вопрос о том, как ведет себя заряженная частичка, движущаяся с определенной скоростью (в частности, постоянной). Решение было найдено, и оказалось, что при  $v \rightarrow c$  оно теряет смысл. Тогда не было видно, почему  $c$  играет какую-то особую роль, почему нельзя взять  $v > c$ . Последний вопрос был поставлен и решен Зоммерфельдом. Решение оказалось забавным: в то время как для  $v < c$  поддержание постоянного значения  $v$  не требует приложения внешней силы, для  $v > c$  нужна сила, т. е. имеется сопротивление и равномерное движение уже не может быть движением по инерции. Зоммерфельд нашел эту реакцию и правильно приписал ее наличию излучения. Таким образом, электрон, движущийся с постоянной скоростью  $v > c$ , излучает, но Зоммерфельд тут же добавляет, что он не знает, как происходит самый переход через  $v = c$ .

Теория относительности утверждает, что в природе нет скоростей, больших  $c$ . Это одно из основных ее утверждений. Тем самым решенная Зоммерфельдом задача потеряла смысл, превратилась просто в математическую задачу. Однако этот вопрос в ином виде возродился теперь вновь. Несколько лет назад П. А. Черенков обнаружил очень слабое, но интересное явление — свечение чистых жидкостей под действием  $\gamma$ -лучей<sup>1</sup>. С. И. Вавилов<sup>2</sup> указал на то, что это не обычная флуоресценция (излучение не тушится тушителями, поляризовано преимущественно вдоль первичных  $\gamma$ -лучей, в отличие от обычной флуоресценции, либо неполяризованной, либо, если ее вызывает поляризованный свет, поляризованной преимущественно так, как и этот первичный свет). Дальнейшие опыты (с магнитным полем) показали, что свечение обусловлено не самими  $\gamma$ -лучами, а вырываемыми ими комптоновскими электронами. И. Е. Тамм и И. М. Франк дали очень изящную теорию этого явления<sup>3</sup>.

Действительно,  $v > c$  невозможно. Но фазовая скорость света в среде есть  $c/n < c$ , и, следовательно, в среде электрон *может* двигаться со скоростью  $v > c/n$ . Конечно,  $c/n$ , вообще говоря, неопределенная величина, ибо  $n = n(\omega)$ , т. е. существует дисперсия и только для  $\omega \rightarrow \infty$  мы во всех телах имеем  $n \rightarrow 1$ . Это обстоятельство — наличие дисперсии — учтено в теории Тамма и Франка, которые показали, что для  $v < c/n$  электрон ведет себя обычным образом, но если для какой-либо  $\lambda v > c/n(\lambda)$ , то он начинает излучать эту длину волны.

Таким образом, здесь опять выплыл наружу электрон, летящий быстрее света, но света в среде, т. е. без противоречия с теорией относительности. Все получается здесь очень элегантно и, быть может, показывает, что рано было забрасывать задачу Зоммерфельда и ждать, пока эксперимент натолкнет на это явление.

Недавно в *Phys. Rev.* появилось сообщение американских авторов, которые проверили и продолжили опыты Черенкова с лучшими средствами. Опыты сделаны хорошо, авторы весьма лояльны по отношению к Черенкову, но теории явления, ее гвоздя, они не поняли совершенно. Они говорят, что это то же самое, что и излучение рентгеновских лучей при торможении, не вида того, что здесь *равномерно* движущийся электрон.

Вторая тема тоже касается вещей, о которых говорилось немало странного — принципа Доплера (1842 г.). Уже в 1848 г. Физо указал, что эффект Доплера пригоден для измерения луче-

<sup>1</sup> [П. А. Черенков. ДАН СССР, 2, 451, 1934.]

<sup>2</sup> [С. И. Вавилов. ДАН СССР, 2, 457, 1934.]

<sup>3</sup> [И. Е. Тамм, И. М. Франк. ДАН СССР, 14, 107, 1937. См. также «Труды Физического института им. П. Н. Лебедева», т. II, вып. 4, 1944.]

вых скоростей звезд. Этот эффект играет большую роль и в наземных явлениях — в акустике, ультразвуке, для каналовых лучей (Штарк), в рассеянии света.

С точки зрения классической лоренцевой физики есть два различных случая: 1) наблюдатель покоится в эфире и движется источник и 2) источник покоится в эфире и движется наблюдатель. В обоих случаях имеет место смещение  $\omega$ , но расчет и интерпретация различны. Принцип относительности считает оба эти случая за один: имеет место *относительное* движение источника и наблюдателя. Этот вопрос действительно прост — речь идет о кинематике: есть среда, есть источник, спрашивается, как должен быть произведен пересчет от одной системы отсчета к другой. Правда, именно с этой точки зрения для классики здесь имелись затруднения, но об этом после.

Вместе с тем этот вопрос и фундаментален. Здесь неважно ни то, что речь идет именно об электромагнитных волнах, неважна природа источника и т. д. Здесь легко понять особенности релятивистской кинематики, ибо речь идет именно о кинематике. Поэтому всякая теория пробует себя в первую очередь на принципе Допплера, и Эйнштейн уже в первой своей работе после общих рассуждений смотрит, как у него выходит принцип Допплера.

Эйнштейн получил результат, отличающийся от классического, хотя и во втором лишь порядке (впрочем, классически второй порядок не был рассчитан). Между тем источник, движущийся настолько быстро, что различие между классикой и теорией относительности уже измеримо современными средствами, имеется. Это — каналовые лучи. Появилась работа Айвса, опыты которого однозначно говорят о том, что в природе существует именно релятивистская кинематика. Между тем в этой работе имеются ссылки на предшествующие *теоретические* работы и нет ни слова о принципе относительности, из которого все так просто выходит. В чем дело — непонятно.

Третья тема касается еще более фундаментального вопроса теории относительности. Один из ее результатов, самый важный и плодотворный — эквивалентность массы и энергии. Именно ввиду общности этого положения его и обосновывают очень общим образом — из электромагнитных соображений. Это естественно, поскольку сама теория относительности выросла из электродинамики. При переходе же к механике закон эквивалентности, закон чрезвычайно общий, обрастает рядом дополнительных предположений. Между тем этот закон важен сегодня именно в механике, в ядерной физике, в актах соударения частиц, в ядерных реакциях. Таким образом, представляет интерес снизить до минимума предпосылки и постулаты, необходимые и достаточные

для механического обоснования закона эквивалентности, являющегося теперь одним из основных законов физики.

Попытки такого обоснования делались неоднократно, с самого возникновения теории относительности (Толмен, Вайль). Несколько лет тому назад (1932 г.) Ланжевен дал очень простое, ясное, и отчетливое изложение чисто механического обоснования. Совсем недавно (1937 г.) такой вывод дал Паули. Здесь все становится ясным — и роль кинематики, и тип законов сохранения.

Но сегодня хотелось бы посмотреть на этот вопрос и с другой стороны. Ядерная физика окончательно подтвердила кинематику теории относительности. Считая закон  $E = mc^2$  правильным, теперь уже поправляют химические веса, т. е. это дает большую точность, чем в состоянии дать химические методы. Но если опыт достаточен для того, чтобы полагать кинетическую энергию  $T$  не в виде  $\frac{mv^2}{2}$ , в виде  $m_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$ , то можно, наоборот, спросить себя: какой тип кинематики совместим с этим выражением кинетической энергии? Этот вопрос следует разобрать. Мне кажется, что единственной пригодной кинематикой является эйнштейновская.

Таковы три темы первого раздела семинара.

При выборе тематики второго раздела я руководствовался существенно иной точкой зрения, и это лежит в существе дела. Всякая физическая теория, поскольку она является теорией, имеет две стороны. Возьмем пример.

Если мы хотим рассматривать колебания закрепленной на концах струны, то теория приводит к следующему уравнению:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

причем при  $x = 0$  и  $x = l$ ,  $\varphi = 0$ .

Теоретическая физика занимается решением и дискуссией таких уравнений (написанное уравнение получается для антенны, для лехера, для органной трубы и т. п.). Интересно и существенно, что

$$\varphi = A \sin (\omega t - kx)$$

будет частным решением при определенных *дискретных* значениях  $k$ . Однако пока все это ничего общего не имеет с физикой. Это математика, это математические обозначения, которые еще надо связать с физическими величинами. Для этого недостаточно просто сказать, что  $x$  и  $\varphi$  — координаты, а  $t$  — время. Надо указать, как измерять эти величины, т. е. нужны твердые тела

(масштабы), часы, рецепты измерений. Если и это дано, то только тогда мы будем иметь дело с физической теорией. В классике подобная постановка вопроса представляла мало интереса: было непосредственно ясно, что и как измерять. И специальная теория относительности в этом отношении целиком классична. Она также мало занимается этими вопросами. Единая теория поля идет здесь уже несколько иначе, а волновая механика идет совсем иным путем, чем шла классика.

Главное, что больше всего поражало при возникновении теории квантов, — это дискретность (энергии, орбиты и т. д.). Я думаю, что Шрёдингер искал такой математический аппарат, который давал бы эту дискретность. И он нашел его в краевых задачах, получив ряд дискретных величин. Таким образом, здесь путь обратный: не от реальных объектов и соответствующих им физических величин к соотношениям между последними, а обратно — от математического аппарата к физике.

Шрёдингер нашел уравнение

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\psi = 0.$$

Вопрос о том, что такое  $x$ ,  $\psi$  и т. д., вопрос об этой второй стороне, которая только и делает теорию физической, встал немедленно. После ряда колебаний и различных мнений Борн стал на статистическую точку зрения:  $|\psi|^2 dx$  есть *вероятность* того, что координата  $x$  лежит в интервале  $(x, x + dx)$ . Но что такое *координата* в квантовой механике? Я это плохо знаю, и вряд ли кто-нибудь это знает. Таким образом, в волновой механике центр тяжести сместился на эту вторую сторону (в классике — тривиальную): как трактовать величины, как связать их с реальными объектами.

И вот я хочу рассмотреть во второй части семинара ряд эпизодических вопросов о том, как и что *измеряют* в квантовой механике. Здесь есть два характерных отличия от теории относительности. Во-первых, в отличие от теории относительности, в волновой механике какое-либо общее положение излагается обычно на частном примере (микроскоп, щель и т. д.). Во-вторых, в квантовой теории вопросы измерений, в отличие от теории относительности, дискуссионны по существу, в них нет окончательной ясности. Может быть, мы сумеем разобраться до конца, может быть, нет, но здесь сам предмет подлежит дискуссии, и дело не в том, что *мы* того или иного не знаем, а в том, что вообще еще нет единообразной и установившейся точки зрения.