

СЕМИНАР ПО НЕКОТОРЫМ ВОПРОСАМ ОПТИКИ И ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ

(1939—1940 гг.)

О РАССЕЯНИИ СВЕТА

(20.XII 1939 г.)¹

Еще совсем недавно весь комплекс вопросов, связанных с рассеянием света, был неясен. Обидно, что вам неизвестен весь генезис этого вопроса. Речь идет здесь об истории самого последнего времени, и актуальность этого генезиса еще очень велика. Все происходило на моих глазах. Несомненно, это одна из интереснейших страниц истории физики.

Что является стержнем, позволившим расшифровать весь комплекс явлений? Это — вопрос о тепловой энергии тела. Оказалось, что существует тесная связь между теорией теплоемкости и теорией рассеяния света. Рассеяние — оптическое проявление тех же процессов, которыми обусловлена теплоемкость тел. Понимание того, что теплоемкость и рассеяние — это одно и то же, было главным фактором в раскрытии всего вопроса. Раньше не приходило в голову, что эти вещи как-то связаны.

Как подошли к этому пониманию?

Вопрос о теплоемкости — гораздо более старый вопрос. Для газов все казалось давно выясненным. Относительно твердых тел 30 лет тому назад просто думали, что каждый атом колеблется около *своего* положения равновесия, с которым он упруго связан. Классическая физика рассуждала так: твердое тело имеет $3n$ степеней свободы; на каждую приходится кинетическая энергия $kT/2$ и потенциальная энергия $kT/2$, т. е. полная энергия kT .

¹ [Из материалов оптического семинара 1939/40 г. сохранились записки двух выступлений Л. И. Мандельштама, которые здесь и помещены. Одно из них, посвященное рассеянию света, записано и обработано Г. С. Гореликом. Второе — это две лекции об отклонениях от законов Френеля. Первая лекция записана и обработана С. М. Рытовым. Вторая лекция обработана Г. С. Гореликом по собственным запискам и затем несколько дополнена по запискам С. М. Рытова.]

Следовательно, энергия всего тела

$$U = 3nkT,$$

откуда

$$C_v = 3nk.$$

Итак, произведение атомного веса на удельную теплоемкость есть постоянная величина $C_v = 6 \text{ кал/град}$ (закон Дюлона и Пти). Действительно, опыт показывает, что для алюминия (атомный вес 27,1) $C_v = 5,5$, для золота (атомный вес 196) $C_v = 5,9$. Правда, такое хорошее совпадение получается не всегда. Уже давно было известно, что для тел с малым атомным весом дело обстоит не так хорошо.

Надо сказать, что Релей *никогда* не удовлетворялся этой теорией. Заведомо есть еще другие степени свободы, помимо тех, о которых шла речь. Об этом свидетельствуют оптические спектры. Между тем «степени свободы не взвешиваются, а *считаются*», и *каждая* степень свободы должна иметь кинетическую энергию $kT/2$. Это как раз и плохо.

Но что же следует из этих вещей по отношению к рассеянию света? До начала XX в. вообще мало занимались рассеянием. Думали, что все дело в «загрязнениях». Еще не так давно считали, что путем тщательной очистки жидкость можно сделать «оптически пустой».

Эйнштейн сделал первый шаг в вопросе о теплоемкости. Он увидел, что воззрения Планка должны и здесь, [т. е. не только в теории излучения] что-то изменить¹. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы *несправедлив*, на каждую колебательную степень свободы приходится средняя энергия не kT , а

$$u = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

При $T \rightarrow 0$ это дает $u \rightarrow 0$; при $\nu \rightarrow \infty$ также $u \rightarrow 0$. Теплоемкость должна вычисляться по формуле

$$C_v = \frac{d}{dT} (3nu) = f(\nu),$$

т. е. она оказывается теперь функцией частоты собственных колебаний атомов. Вот это главное, и это было с облегчением встречено физиками. (В сущности, для вычисления полной внутренней

¹ [A. Einstein. Ann. Physik, 22, 180, 800, 1907.]

энергии тела надо не множить u на $3n$, а брать сумму

$$\sum_i \frac{h\nu_i}{e^{h\nu_i/kT} - 1},$$

распространенную на все частоты собственных колебаний. Из оптики известно, однако, что для дальнейших членов ν_i очень велики и, таким образом, эти члены отпадают).

Релей не принимал этого решения вопроса, он не мог с этим сжиться.

О рассеянии света пока не говорится ни слова, и на данном этапе это и не удивительно. Интересно, как дело пошло дальше.

Тот же Эйнштейн взялся за рассеяние¹. Он был тогда в расцвете сил, во всем, за что он брался, он делал фундаментальные вещи.

Эйнштейн говорит следующее. Из-за флуктуаций плотность тела является функцией точки, $\rho = \rho(x, y, z)$. Можно разложить $\rho(x, y, z)$ в ряд Фурье, изучить статистически амплитуды разложения и найти по ним рассеяние. Удивительно, что при этом не говорится *ни слова* о теплоемкости. У Эйнштейна ρ задано статически, никакой динамики нет.

Два года спустя к теплоемкостям возвращается Дебай², у него новая, очень красивая идея. Верно то, что твердое тело имеет $3n$ степеней свободы. Но это степени свободы *связанных* осцилляторов. Некоторые степени свободы мы хорошо знаем: это — упругие волны. Они тоже являются собственными колебаниями системы связанных осцилляторов. Предположим, что всем $3n$ степеням свободы соответствуют упругие колебания; тогда существуют $3n$ отдельных упругих волн.

Здесь в первый раз высказывается мысль, что тепловая энергия есть энергия упругих волн. Но о рассеянии — опять *ни слова*.

Однако к нему подошли очень близко. Остался только последний шаг. Надо было сказать: «формальные волны» Эйнштейна, на которых происходит рассеяние, *это и есть* дебаевские волны, определяющие энергию теплового движения тела.

Теперь это кажется очень простым, но в то время такие люди, как Эйнштейн и Дебай, не видели связи. В последующие годы удалось показать, что это одно и то же, но досталось это не так легко³.

¹ [A. Einstein. Ann. Physik, 33, 1275, 1910.]

² [P. Debye. Ann. Phys., 39, 789, 1912.]

³ [См. том I, статьи 22, 27 и 29.]