

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**КНИГА С. И. ВАВИЛОВА «МИКРОСТРУКТУРА СВЕТА» \*)****В. А. Фабрикант**

С горьким чувством свежей утраты берёшь в руки эту небольшую книгу, неожиданно ставшую последним итогом работ С. И. Вавилова по основным проблемам оптики.

Нам хочется подчеркнуть, что в книге идёт речь действительно о ряде основных проблем оптики. Книга показывает широту и глубину научных интересов С. И. Вавилова. Она отражает облик С. И. Вавилова как учёного, который лучше всего характеризуется словом естество испытатель.

С. И. Вавилов никогда не удовлетворялся формальным решением проблемы и всегда давал прямые экспериментальные подтверждения основных теоретических положений. Недаром конец предисловия к книге посвящён формализму, имеющему ещё место в решении ряда проблем оптики.

Наряду с вопросами люминесценции, составлявшими лейтмотив научного творчества С. И. Вавилова, в книге изложены важные результаты, полученные им в других областях оптики. Существенно отметить, что сами вопросы люминесценции трактуются с точки зрения их общего значения. В книге наглядно показано, сколь не верна общепринятая точка зрения, что исследование сложных объектов при помощи сравнительно простых методов не может дать ясных и фундаментальных результатов. С. И. Вавилов доказал, что исследование люминесценции сложных молекул представляет эффективный путь для выяснения общих свойств элементарных излучателей.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы дать краткое изложение основного содержания книги. Задача нелёгкая, ибо сама книга уже представляет весьма сжатую сводку и содержит огромный материал.

---

\*) С. И. Вавилов, Микроструктура света (исследования и очерки) АН СССР, М., 1950, 198 стр.

В предисловии С. И. поясняет несколько своеобразное название книги и тем самым определяет круг проблем, в ней затронутых.

Он пишет: «... всегда молчаливо предполагается, что любой источник света и любой световой поток вполне могут быть характеризованы тремя признаками: энергией излучения, спектром и состоянием поляризации. В действительности это практически достаточно только для решения задач макрооптики, оптики значительных световых мощностей, длительных времён наблюдения, больших размеров источника излучения. За макрооптикой скрывается микрооптика, отличающаяся от первой в некоторых отношениях так же, как термодинамическое учение о веществе отличается от его молекулярной теории» (явная описка — должно быть наоборот. — В. Ф.).

К микрооптике относятся: флуктуации светового потока, интерференционные свойства очень малых излучателей, проявления длительности возбуждённых состояний молекул и, наконец, взаимодействия светящихся молекул с окружающей средой.

Соответственно содержание книги разбито на три части.

1) экспериментальные исследования световых флуктуаций визуальным методом; 2) о предпосылках и некоторых выводах элементарного учения об интерференции света; 3) свойства света, излучаемого поглощающей средой.

Переходим к изложению конкретного содержания отдельных частей книги.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ВИЗУАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Для наблюдения световых флуктуаций естественно необходимо экспериментировать с очень слабыми источниками света или световыми потоками. Интересно, что «Два эти условия не равносильны для классического (волнового) и квантового рассмотрения вопроса» (стр. 9).

Согласно классическим представлениям «... световые флуктуации должны в очень большой степени зависеть от физического состояния источника света...» (стр. 10).

«Квантовая природа излучения в корне меняет характер флуктуационных явлений. Даже... когда с классической точки зрения световые флуктуации могут отсутствовать, должны в полной мере проявляться квантовые флуктуации, определяемые так называемой «спонтанной» независимостью актов излучения отдельных молекул» (стр. 10).

Для частного случая абсолютно чёрного излучения справедлива формула Эйнштейна (стр. 10):

$$\overline{(\Delta E_0)^2} = h\nu E_0 + \frac{c^3}{8\pi\nu^2\Delta\nu} \cdot \frac{E_0^3}{\nu_0}, \quad (1)$$

где  $E_0$  — энергия излучения;  $(\overline{\Delta E_0})^2$  — средний квадрат флуктуаций;  $v$  — объём полости чёрного тела,  $\nu$  — частота,  $\Delta\nu$  — рассматриваемый интервал частоты. Первый член в правой части (1) представляет квантовые флуктуации, а второй член — «классические» флуктуации.

Первый член может быть получен из самых элементарных статистических соображений, учитывающих квантовую природу излучения.

Второй член начинает играть заметную роль только при температурах порядка 30 000°.

Квантовые флуктуации должны наблюдаться независимо от состояния источника света при достаточном разрежении наблюдаемого светового потока.

Экспериментальное исследование световых флуктуаций представляет большой интерес по двум причинам: 1) наблюдение квантовых флуктуаций является прямым подтверждением квантовой природы излучения; 2) наблюдение «классических» флуктуаций даёт новый метод исследования физических условий, существующих в источнике света (для равновесного излучения — определение температуры, а для неравновесных случаев возможно получение результатов, вообще не описываемых формулой (1)).

С. И. Вавилов предполагал использовать наблюдения световых флуктуаций в обоих направлениях, но, к сожалению, успел закончить только первую серию исследований, посвящённых квантовым флуктуациям.

Замечательна по своей простоте использованная им экспериментальная методика.

При надлежащих условиях человеческий глаз оказывается наилучшим приёмником для исследования световых флуктуаций в видимой части спектра.

Прежде всего, минимальная зрительно воспринимаемая энергия составляет всего лишь 100—200 фотонов, падающих в секунду на наш глаз. До сетчатки безусловно доходит значительно меньшее число фотонов. Ещё меньшее число фотонов поглощается сетчаткой. Число поглощённых фотонов измеряется немногими десятками.

При таких условиях флуктуации поглощенной энергии должны быть очень велики.

«Важно подчеркнуть, что визуальное наблюдение и измерение (флуктуаций. — В. Ф.) чрезвычайно облегчается наличием резкого порога зрительного ощущения. Зрительный эффект в области порога изменяется прерывно, он очень быстро падает до нуля при некотором «порожном» значении световой энергии» (стр. 14).

Однако для использования этих преимуществ глаза, как приёмника лучистой энергии, необходимо создание соответствующих условий.

Поэтому С. И. Вавилов резко критикует Барнеса и Черни, правильно предсказавших возможность визуального наблюдения световых флуктуаций, но поставивших совершенно ошибочные опыты для реализации этой возможности.

Наблюдавшиеся в этих опытах флуктуации вызваны чисто физиологическими причинами (отсутствие фиксации точки).

С. И. Вавилов указывает, что: «...наблюдение квантовых флуктуаций при непрерывном световом потоке невозможно вследствие конечной длительности зрительного впечатления и вытекающего отсюда усреднения флуктуаций. Невозможно также наблюдение флуктуаций при больших угловых размерах светящейся поверхности. Далее, для наблюдения квантовых флуктуаций необходимо фиксировать глаз (ввиду неодинаковой чувствительности отдельных точек сетчатки. — В. Ф.)» (стр. 14).

Следовательно, для наблюдения физических флуктуаций при порожных световых потоках необходимо соблюдение трёх условий:

- 1) кратковременность вспышек,
- 2) небольшие размеры изображения на сетчатке и
- 3) фиксация глаза.

Кроме того, следует использовать периферическое зрение, соответствующее наибольшей чувствительности глаза.

Благодаря наличию резкого порога те вспышки, энергия которых меньше некоторой предельной величины, вообще не видны.

Если обозначить через  $n_0$  число фотонов, соответствующее порогу, то видны будут только вспышки, соответствующие числу фотонов, большему чем  $n_0$ .

Если  $n$  — среднее число фотонов, поглощаемых в единицу времени, то, как показал С. И. Вавилов, вероятность наблюдения вспышки может быть определена при помощи приближенной формулы (формула (13), стр. 17)

$$P = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_0}{2} \frac{(1-x)}{\sqrt{x}}}, \quad (2)$$

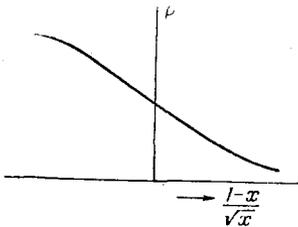


Рис. 1. Вероятность  $P$  как функция  $\frac{1-x}{\sqrt{x}}$ , где

$$x = \frac{n}{n_0}.$$

На рис. 1 (рис. 1, стр. 17) изображён точный ход  $P$ , как функции  $\frac{1-x}{\sqrt{x}}$ . Формула (2) соответствует средней прямолинейной части кривой.

Наклон прямолинейной части кривой даёт возможность прямого определения  $n_0$ . Важно отметить, что даже если само  $n_0$  испытывает колебания, всё же формула (2) годна для определения среднего значения  $n_0$ .

При создании экспериментальной установки были учтены все сформулированные выше требования.

В книге приведена любопытная фотография «с птичьего полёта» первой экспериментальной установки 1933 года для измерения зрительных квантовых флуктуаций.

На рис. 2 (рис. 3, стр. 20) изображена схема более позднего варианта экспериментальной установки.

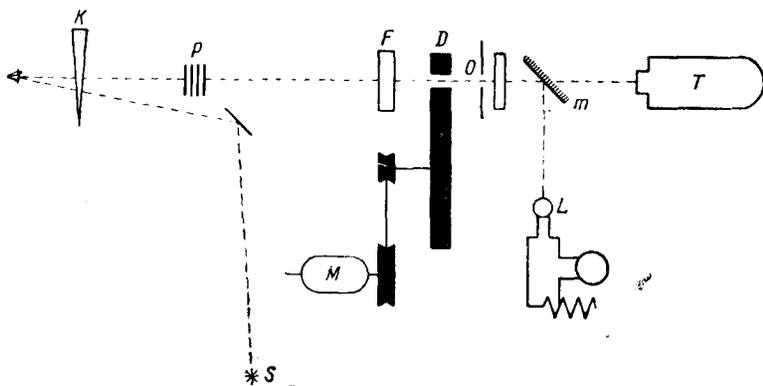


Рис. 2. Схема второй установки для измерения зрительных квантовых флуктуаций.

Свет лампочки  $L$  отражался от зеркала  $m$ , проходил через диафрагму  $O$ , закрытую молочным стеклом, и падал на медленно вращающийся (1 оборот в секунду) диск с отверстием  $D$ . Диск пропускал свет в течение 0,1 сек. и задерживал его в течение 0,9 сек. Зелёный фильтр выделял нужный участок спектра. Свет можно было ослаблять при помощи стопы стеклянных пластинок  $P$  и клина  $K$ . Для фиксации глаза, чтобы свет от лампы  $L$  попадал всё время на одну и ту же точку периферии сетчатки, была использована вторая лампа  $S$  с красным фильтром. Угловое расстояние между красным и зелёным пятнами было обычно равно  $8^\circ$ .

Обороты диска регистрировались хронографом на ленте. Наблюдатель нажатием ключа отмечал на той же ленте видимые им вспышки. При больших яркостях зелёного пятна естественно отметки оборотов совпадали с отметками вспышек.

При снижении яркости начинались пропуски в отсчётах наблюдателя. Обработка лент показала, что наблюдается типичная флуктуационная картина.

На рис. 3 (рис. 6, стр. 25) приведены результаты измерений четырёх наблюдателей, находящиеся в хорошем согласии с формулой (2).

Вообще к этим опытам было привлечено большое число наблюдателей и собран огромный статистический материал.

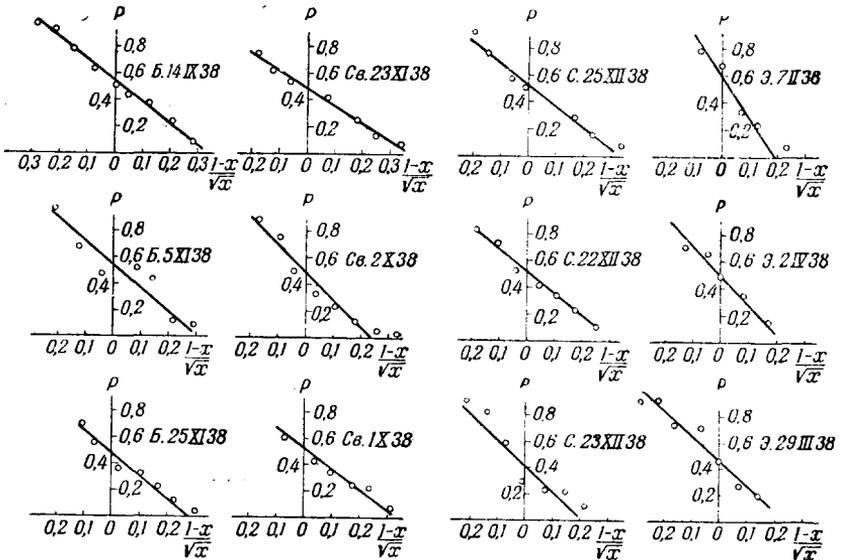


Рис. 3. Результаты флуктуационных измерений четырёх наблюдателей.

Полученные данные позволили определить  $n_0$ . Для различных наблюдателей  $n_0$  колеблется от 8 до 47. Число падающих при этом на глаз фотонов  $N$  колеблется в пределах от 108 до 335.

Таким образом в качестве побочного результата удалось определить, какая доля падающих на глаз фотонов активно поглощается сетчаткой. Полученные соотношения неплохо согласуются с физиологическими данными.

В 1941 г. З. Гехт с сотрудниками повторил опыты С. И. Вавилова (правда, в значительно меньшем объеме) и получил примерно те же результаты.

В первой публикации З. Гехт умолчал о приоритете С. И. Вавилова. В подробной статье 1942 г. он это сделал, однако в форме, вызвавшей резкую и справедливую критику С. И. Вавилова (примечание на стр. 32—33).

«В 1944 г., — как пишет С. И. Вавилов, — метод зрительных квантовых флуктуаций был ещё раз «открыт» в Утрехте ван дер Вельденом» (стр. 34). Этот автор сначала не ссылаясь вооб-

ще на предшественников, а затем стал ссылаться только на американские работы. Результаты, полученные в голландских работах, резко отклоняются от результатов других работ и вызывают сильные сомнения ( $n_0 = 2!$ ). Наконец, Баумгардт (Париж) в книге, вышедшей в 1950 г., сообщает об аналогичных измерениях, проведённых в его лаборатории, и приводит результаты, согласующиеся с данными С. И. Вавилова.

Если основные флуктуационные эксперименты были повторены позднее другими исследователями, то ряд интересных данных получен только С. И. Вавиловым и его сотрудниками.

Сюда относятся зависимость  $n_0$  от длины волны, влияние повышения порога и, наконец, наблюдения флуктуаций когерентных пучков, флуктуаций поляризации и флуктуаций в интерференционном поле.

В опытах с флуктуациями когерентных пучков использована схема, изображённая на рис. 2. Только между диском и глазом помещена френелева бипризма с преломляющим ребром, расположенным горизонтально. Таким образом в поле зрения видны два когерентные пятна, симметрично расположенные по отношению к красной фиксационной точке.

При достижении порожней яркости обе точки совершенно отчётливо флуктуируют друг относительно друга. Вероятность одновременного наблюдения обоих пятен очевидно равна  $P^2$ . Иными словами, корень квадратный из этой вероятности должен удовлетворять формуле (2).

Экспериментальные результаты этих трудных измерений подтверждают такой вывод.

С. И. Вавилов пишет: «Это явление независимых относительных колебаний когерентных лучей имеет катастрофическое значение для волновой теории...» (стр. 48).

Для наблюдения флуктуаций поляризации была использована призма Воластона. Два зелёных пятна были в этом случае поляризованы во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Как и в предыдущем опыте, оба пятна флуктуировали совершенно независимо.

На рис. 4 (рис. 14, стр. 49) по оси ординат отложен  $\sqrt{p}$  ( $p$  — вероятность одновременного наблюдения двух пятен) в зависимости от  $\frac{1-x}{\sqrt{x}}$ . Мы видим, что опять прекрасно выполняется основное соотношение (2).

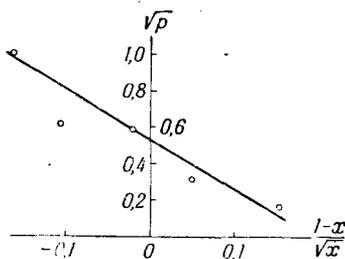


Рис. 4. Результаты опыта с поляризованными лучами.

Наблюдения флуктуаций в интерференционном поле производились на той же установке, что и все другие опыты, но на пути лучей ставилась двойная щель Юнга и диафрагма с двумя отверстиями. Одно отверстие располагалось против светлой интерференционной полосы, а другое — против тёмной полосы. Наблюдались и количественно измерялись флуктуации светлой интерференционной полосы. Тёмная полоса оставалась всё время тёмной.

«Перед наблюдателем в этом опыте с особенной наглядностью проявляется корпускулярно-волновая двойственность светового процесса» (стр. 129).

Вся совокупность флуктуационных опытов С. И. Вавилова поражает тем мастерством, с которым использованы свойства такого «прибора», как человеческий глаз.

Результаты этих опытов имеют не только важное физическое значение, но и дают новые сведения о самом глазе.

Весьма интересным было бы развитие второй линии флуктуационных исследований («классические» флуктуации), намеченной С. И. Вавиловым.

## 2. О ПРЕДПОСЫЛКАХ И НЕКОТОРЫХ ВЫВОДАХ ЭЛЕМЕНТАРНОГО УЧЕНИЯ ОБ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА

В этой части имеет место своеобразное и очень удачное сочетание изложения оригинальных работ автора со значительным дидактическим материалом. Казалось бы, уже трудно сказать новое в такой устоявшейся области оптики, как интерференция.

Однако С. И. Вавилов это сделал и сделал с подлинным блеском. В его руках старое древо классической оптики вновь стало давать плоды.

Достаточно назвать установление связи между широкоугольной интерференцией и свойствами элементарных излучателей и открытие эффекта Черенкова.

Вторая часть начинается с краткого анализа преимуществ и недостатков интерференции как метода и как принципа. Характерно для С. И. Вавилова воспроизведение двух страниц из «Новой теории света и цветов» Л. Эйлера (1746 г.), устанавливающих его приоритет в создании представления о световых пучках, как о резко ограниченных каналах, внутри которых волнообразно распространяется световая энергия; это представление, как известно, сыграло существенную роль в развитии учения об интерференции.

Далее излагаются результаты работ С. И. Вавилова, касающихся проверки пределов выполнимости в вакууме основного принципа оптики — принципа суперпозиции. Это — вопрос о саморассеянии света, явлении, которое Ломоносов называл «в лучах замешательство». Опыты с мощной искрой (1928—1930 гг.), свет

которой сходилась внутри эвакуированного сосуда, дали отрицательный результат. Здесь остроумно было использовано сопоставление двух источников света с одинаковой средней мощностью, но с резко различной концентрацией плотности излучения по времени. Плотность излучения достигала  $10^{11} \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$ .

Из данных о яркости солнечной короны была произведена оценка наибольшей величины светорассеяния, которая не превышает  $1,8 \cdot 10^{-17}$  на один сантиметр пути светового луча. В случае искры отсюда получается, что для обнаружения отклонений от суперпозиции необходим приёмник, реагирующий на мощность излучения, меньшую чем  $1,8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$ .

При распространении света в поглощающем веществе вопрос о пределах применимости принципа суперпозиции обстоит сложнее.

Здесь квантовые свойства излучения и поглощающих молекул могут приводить к нарушению принципа суперпозиции и тем самым делать волновое уравнение для световых волн нелинейным.

В 1920 г. С. И. Вавилов опубликовал результаты опытов по проверке независимости поглощения света от яркости в широких пределах. В этих опытах при измерениях впервые было использовано существование зрительного порога.

Яркость источника изменялась накалом лампы и была изящно обойдена трудность, связанная с изменением спектра при изменении накала. Использовалось не само излучение лампы, а возбуждённая им люминесценция родамина, которая при этом сохраняла свой спектральный состав.

Исследовались желатиновые плёнки, окрашенные родамином, водные растворы родамина, фуксина и других красителей.

При изменениях плотности светового потока от  $2,5 \cdot 10^{-12}$  до  $2 \cdot 10^8 \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$  (т. е. на двадцать порядков!) поглощение оказалось постоянным с точностью до 5%.

С. И. Вавилов напоминает, что в те годы Планк во втором издании своей известной книги по тепловому излучению предлагал очень своеобразный вариант квантовой теории.

Согласно этому варианту молекулы поглощают свет непрерывно, а излучают квантами. Опыты С. И. Вавилова резко противоречили этому представлению, ибо при самых малых интенсивностях время, нужное для накопления в молекуле одного кванта, превышало бы тридцать миллионов лет! На верхней границе интенсивностей это время становилось порядка  $10^{-5}$  сек.

В первом случае согласно гипотезе Планка вещество должно быть совершенно непрозрачным, а во втором — обладать нормальной прозрачностью.

В более поздних опытах С. И. Вавилова и В. Л. Левшина были обнаружены заметные нарушения линейности при измерениях поглощения уранового стекла. Это чисто квантовый эффект, связанный с конечной продолжительностью возбуждённых состояний, на который редко обращают внимание.

В результате возбуждения число поглощающих центров может заметно уменьшиться при достаточно большой продолжительности жизни возбуждённых состояний, тогда как коэффициент поглощения классических осцилляторов, конечно, не зависит от амплитуды их колебаний. В фосфорах наблюдаются большие нелинейные эффекты такого типа. Нелинейность фосфоров была даже использована для построения оригинального фотометра без лампы сравнения.

«Однако физика настолько свыклась с линейностью обыденной оптики, что до сих пор нет даже формально строгого математического аппарата для решения реальных „нелинейных“ задач» (стр. 73).

Давая очень глубокое и ясное изложение основ теории интерференции, С. И. Вавилов показывает возможность получения когерентных, но не интерферирующих световых пучков. Очень интересно сведение любой интерференции к интерференции параллельных и антипараллельных пучков (стр. 87).

Наряду с этим отмечается, что возможно получение когерентного света от двух разных частиц вещества, находящихся на расстоянии, измеряемом несколькими диаметрами частиц (стр. 78).

Судя по конкретности замечаний, С. И. Вавилов намечал постановку соответствующих экспериментов.

С. И. Вавилов вводит термин «интерференция Френеля» для интерференции между различными пучками, распространяющимися от одной и той же светящейся точки, и противопоставляет её «интерференции Ньютона», возникающей при расщеплении одного пучка. Он рассматривает особенно подробно интерференцию Френеля, как непосредственно связанную со свойствами источников излучения.

Здесь следует отметить прозрачный анализ вопроса о разрешающей способности интерферометров и детальный разбор роли размеров источника. Последнее сделано в качестве подготовки к изложению поистине классических опытов С. И. Вавилова по широкоугольной интерференции.

Интересна история этих опытов. В своём докладе на физической секции конференции в Московском государственном университете в 1944 г. С. И. Вавилов говорил («Природа» 1945 г. № 4): «В 1923 г. появилась экспериментальная работа Шредингера. Она была посвящена как раз вопросу об интерференции под большими углами от тонкой накалённой воластоновой нити, причём при угле около  $60^\circ$  Шредингер не заметил никаких особенностей интерференционной картины. Опыты ставились для решения актуального в то время вопроса

о том, существует ли так называемое „игольчатое излучение“ (Nadel-Strahlung), на возможность которого с квантовой точки зрения указал А. Эйнштейн. Курьёзно при этом, что Шредингер не заметил, что классическая теория излучения также приводит к необходимости необычных явлений при интерференции лучей под большими углами».

В обычных интерференционных опытах мы всегда имеем дело с малыми углами. Для наблюдения широкоугольной интерференции необходимы источники света исключительно малых размеров, соизмеримых с длиной световой волны. В этом трудность наблюдения широкоугольной интерференции. Зато широкоугольная интерференция даёт новый метод изучения свойств элементарных излучателей. Модель излучающего атома или молекулы в виде линейного электрического диполя, как известно, перешла из классической физики в квантовую. Квантовая механика даёт метод расчёта излучения такого диполя, приводящий к результатам, согласующимся с опытом. Одним из наиболее характерных свойств диполя является направленность его излучения, рис. 5 (рис. 29, стр. 106). Вместе с тем при анализе интерференционных опытов мы пользуемся обычно упрощенным представлением об элементарном излучателе. С. И. Вавилов пишет, что: «Обычное упрощенное представление об изотропно светящейся точке должно быть отнесено к группе совершенно абстрактных и ошибочных образов, так как ни один из реальных элементарных излучателей не может ей соответствовать» (стр. 105). Однако легко видеть, что при наблюдении интерференции лучей, образующих малые углы, направленность излучения элементарных излучателей практически несущественна; интенсивности, излучаемые диполем по двум близким направлениям, практически равны между собой.

Ситуация резко меняется при наблюдении широкоугольной интерференции, когда угол между лучами велик. Следует помнить, что по сути когерентны между собой волны, выходящие из одного и того же излучателя. Следовательно, хаотичность расположения диполей мало что меняет, и нельзя говорить об усреднённых по направлениям характеристиках излучателей. Луч, испущенный каким-либо излучателем, «узнает» при встрече другой луч, испущенный тем же излучателем, и только с ним будет интерферировать. Поэтому важно соотношение амплитуд именно этих лучей, вышедших из одного элементарного излучателя по совсем разным направлениям (мы намеренно используем язык элементарной теории интерференции).

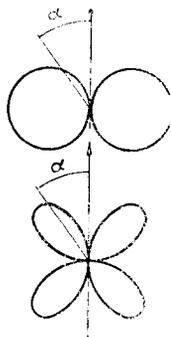


Рис. 5. Плоские диаграммы пространственного излучения электрического диполя и квадруполя.

На рис. 6 (рис. 32, стр. 107) изображены два расположения излучающего диполя  $O$  при наблюдении интерференции в предельном случае, когда угол между лучами равен  $180^\circ$ . Зеркала  $S_1$  и  $S_2$  образуют углы в  $45^\circ$  с направлением лучей и делают их параллельными. Далее следует представить объектив, который сводит оба луча в своей фокальной плоскости, где и возникает интерференционная картина. Векторы  $A$  и  $B$  изображают световые колебания. Мы видим, что в первом случае в центре интерференционной картины будет, как обычно, светлая полоса, но во втором случае получится тёмная полоса, несмотря на равенство длин оптических путей! При хаотическом расположении диполей каждый из них можно разложить на три компоненты, одна из которых направлена по линии наблюдения и несущественна, а две другие взаимно перпендикулярны и соответствуют случаям  $a$  и  $b$  рис. 6.

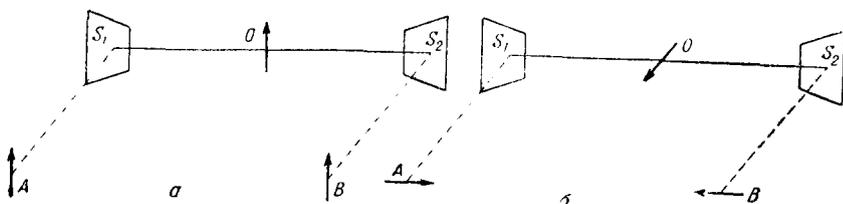


Рис. 6. Излучающий диполь между зеркалами, повернутыми на  $45^\circ$  к оси их соединяющей:  $a$  — диполь перпендикулярен к плоскости  $S_1AS_2B$ ;  $b$  — диполь параллелен плоскости  $S_1AS_2B$ .

Ясно, что одновременное существование двух диполей  $a$  и  $b$  приведёт к исчезновению видимости интерференционной картины\*) (светлая полоса случая  $a$  совпадает с тёмной полосой случая  $b$ ), но нетрудно видеть, что равномерное в смысле интенсивности поле интерференции будет обладать полосатой поляризационной структурой вследствие того, что в одних местах будут уничтожаться горизонтальные колебания (например, в центре), в других вертикальные. При наблюдении сквозь призму николя должны возникнуть интерференционные полосы, смещающиеся на одну полосу при повороте николя на  $90^\circ$ . С. И. Вавилов рассмотрел общий случай, когда угол между лучами равен  $\varphi$ . Тогда видимость интерференционной картины (без николя) равна  $V = \frac{1 + \cos \varphi}{2}$ . Для квадрупольей получатся  $V = \frac{1 + \cos \varphi}{2} - \sin^2 \varphi$ .

Таким образом, наблюдая зависимости видимости интерференции от угла, можно выяснить, являются ли элементарные излучатели диполями или квадрупольями.

\*) Шредингер сделал бы вывод о некогерентности лучей, т. е. об «игольчатом излучении»! — В. Ф.

При реализации опытов с широкоугольной интерференцией С. И. Вавиловым и Е. М. Брумбергом была использована ультрамикроскопическая установка. Объектив микроскопа был закрыт станионом с двумя отверстиями. Углы между лучами изменялись в пределах от 10 до 130°. Источниками света служили мельчайшие кристаллики азотнокислого уранила, взвешенные в парафиновом масле. Наблюдалось либо собственное свечение кристалликов в результате люминесценции, либо свет, рассеянный кристалликами. Полученные результаты блестяще согласуются с изложенными выше соображениями. В частности, наблюдалось исчезновение интерференционных полос при достаточно большом  $\varphi$  и появление полос при введении николя между окуляром и глазом. Эти опыты и их теория должны войти в курсы физики как прекрасная иллюстрация основных свойств элементарных излучателей.

В книге уделено внимание своеобразным интерференционным парадоксам, свидетельствующим о недостаточности обычного описания свойств естественного света. «Пусть на пути двух параллельных когерентных квазимонохроматических естественных пучков, интерферирующих между собой, помещены две различные среды — одна, вращающая плоскость поляризации, другая неактивная, ... причём оптически активная среда вращает плоскость поляризации ... на 90°. Оба пучка, прошедших соответственно через активную и неактивную среду, остаются естественными, т. е. ... должны бы остаться экспериментально неотличимыми друг от друга. В действительности при интерференции должно обнаружиться их различие. При указанных условиях (несмотря на когерентность! — В. Ф.) пучки не будут интерферировать... Такой интерференционный опыт позволяет осуществить измерение, кажущееся на первый взгляд невозможным и внутренне противоречивым, а именно: определить вращение плоскости поляризации неполяризованного света» (стр. 118—119). Аналогичный опыт возможен с пластинкой в полволны. Эти опыты С. И. Вавилова являются новыми интерференционными опытами, имеющими большое принципиальное значение.

Всего пять страниц книги посвящено замечательному эффекту Черенкова, открытому под руководством и при непосредственном участии С. И. Вавилова. За последние годы стало выясняться большое значение этого эффекта для различных областей физики, а не только для оптики в узком смысле слова.

Важно отметить, что этот эффект по сути является сугубо «классическим» эффектом и непосредственно вытекает из самых элементарных интерференционных соображений. С. И. Вавилов пишет: «Здесь не воспроизводится общая теория нового явления; излучение Черенкова рассматривается здесь потому, что оно, по крайней мере в своей элементарной интерпретации, представляет весьма интересный и многозначительный пример применения интерференционного метода в оптике» (стр. 120).

Как известно, излучение Черенкова возникает при движении в среде электронов со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде.

С. И. Вавилов даёт элементарное и ясное изложение теории излучения Черенкова, развитой И. М. Франком и И. Е. Таммом, пользуясь по пути методом зон Френеля. В результате интерференции когерентных вторичных волн, испущенных молекулами среды, возмущённым полем пролетающего электрона, возникает результирующая волна, идущая под углом  $\theta$  к направлению полёта электронов. Угол  $\theta$  определяется простой формулой (формула (68), стр. 124)

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}, \quad (3)$$

где  $v$  — скорость движения электронов,  $n$  — показатель преломления среды. Принципиальным здесь является то, что с макроскопической точки зрения излучение Черенкова не есть результат ускоренного движения заряда, в противоположность всем ранее известным видам излучения. Это не поняли американские исследователи, повторившие опыты Черенкова.

С. И. Вавилов приводит также элементарный квантовый вывод формулы (3).

Из формулы (3) вытекает основное замечательное свойство излучения Черенкова — его направленность. Несмотря на краткость изложения, характерно, что С. И. Вавилов обращает внимание читателя на некоторые выводы из интерференционного толкования излучения Черенкова, ещё не проверенные на опыте. В частности, он указывает на возможность наблюдения эффекта Черенкова при скоростях электронов, меньших скорости света, но при экспериментировании с тонкими плёнками (стр. 124).

### 3. СВОЙСТВА СВЕТА, ИЗЛУЧАЕМОГО ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Эта часть начинается с очень свежей и глубокой постановки вопроса о применимости отдельных понятий «источника света» и «среды».

«Оптика, почти во всём её объёме, построена на молчаливом предположении, что свойства света и его внутренняя структура вполне определяются особенностями источника и среды, отдельно характеризуемых постоянными количественными признаками...

Такое предположение, однако, верно только приближённо и имеются случаи, притом частые и практически важные, когда от него необходимо отказаться и перейти к более общему представлению об источнике и среде как целом, органически связанном...

...Упомянутая предпосылка решения оптических задач о возможности отдельной интерпретации источника света и среды

фактически равносильна предположению, что расстояние  $r$  между излучающей частицей вещества и частицами, поглощающими или рассеивающими свет, намного превосходит длину световой волны  $\lambda$ ... Это предположение почти всегда строго выполняется, если из рассмотрения исключены процессы, происходящие в самом источнике света, и принимается, что среда, в которой свет распространяется, сама света не излучает...

Им, строго говоря, никогда нельзя пользоваться для обширного круга повседневных случаев среды, светящейся и одновременно поглощающей свет. Таковы прежде всего сами источники света (накалённые тела, газосветные и люминесцирующие светильники) и, далее, среды, рассеивающие свет и люминесцирующие» (стр. 133—134).

С. И. Вавилов подчёркивает, что обычно «упускается из виду активная роль соседних молекул, способных поглощать свет. Вследствие резонанса такие частицы могут воздействовать на светящийся центр, изменять характер его излучения (прежде всего его ослабляя), в то время как удалённые молекулы только пассивно поглощают свет. Кроме того, соседние молекулы определяют начальное, основное звено процесса перемещения (миграции) энергии возбуждения в среде» (стр. 134).

С. И. Вавилов указывает, что наиболее простые и ясные условия для наблюдения явлений, связанных с указанными взаимодействиями молекул, имеются в жидких и твёрдых люминесцирующих средах. Конденсированная фаза вещества имеет в данном случае преимущество перед газообразной, ибо «не даёт возможности взаимодействующим соседним молекулам отходить одна от другой за короткое время длительности возбуждённого состояния» (стр. 134).

«Существенно подчеркнуть ещё раз, что в растворах сложных молекул резонансные индуктивные переходы должны происходить чаще потому, что вязкость среды затрудняет значительное удаление взаимодействующих молекул за время возбуждённого состояния, вследствие чего резонанс может развиваться в полной мере даже при недостаточной „остроте настройки“» (стр. 144).

Тем самым становится понятной плодотворность экспериментальных исследований люминесценции жидких и твёрдых тел для решения основной проблемы источник — среда.

Анализируя возможные при этом эффекты, С. И. Вавилов обращает внимание на существование «обратной связи» между близкими молекулами, которая в случае сложных молекул должна приводить к неселективному ослаблению энергии излучения (тушение).

Кроме того, поглощение излучения слоем близких молекул должно быть аномальным. В обычных условиях, при большой толщине всего люминесцирующего слоя, этот эффект маскируется

нормальным поглощением далёких слоёв, но при экспериментах с тонкими слоями аномальное поглощение должно выступить на первый план.

Наконец, упомянутая выше миграция энергии будет влиять на тушение и вызывать деполяризацию излучения.

С. И. Вавилов отмечает, что в литературе установилось неправильное представление о миграции энергии без посредства излучения как о чисто квантовом эффекте. На самом деле этот эффект должен иметь место и согласно классическим представлениям за счёт индуктивного взаимодействия близких диполей.

Собственно говоря, под углом зрения проблемы источник — среда в книге и изложены основные результаты ряда работ С. И. Вавилова, его сотрудников и учеников по исследованию люминесценции.

Эта проблема явилась стержнем, вокруг которого сгруппирован огромный теоретический и экспериментальный материал.

Трудность всех этих экспериментов заключалась в отделении «нетривиальных» изменений света, связанных с указанными эффектами, от «тривиальных», вызванных обычным повторным поглощением и излучением на больших расстояниях. «Тривиальные» эффекты естественно растут с толщиной слоя. «Нетривиальные» эффекты сохраняются при таких малых толщинах, когда обычное поглощение и повторное излучение уже не могут иметь места. Однако «нетривиальные» эффекты связаны с перекрытием спектров поглощения и излучения (Ф. М. Пекерман), так же как и «тривиальные».

Увеличение концентрации приводит к уменьшению расстояния между молекулами и, соответственно, к усилению взаимодействия между ними. На рис. 7 (рис. 44, стр. 141) приведены характерные «нетривиальные» зависимости от концентрации степени поляризации, длительности возбуждённого состояния и выхода люминесценции.

Попытки объяснить ход указанных кривых, исходя из слишком конкретной структуры молекул, до сих пор приводили к противоречиям с экспериментами. С. И. Вавилов поэтому выбрал иной, полуфеноменологический путь, оставив без рассмотрения закон взаимодействия молекул.

Этот методологический приём оказался в данном случае исключительно удачным. Удалось не только объяснить множество фактов, но и предсказать ряд новых, вскоре открытых фактов.

История науки знает много примеров такого разумного и удачного ограничения задач теории на определённом этапе её развития. Нам кажется, что при выборе пути решения данной проблемы не последнюю роль сыграли работы С. И. Вавилова в области истории науки и философии.

В книге довольно подробно изложена теория, развитая С. И. Вавиловым. В этой теории фигурируют вероятности различных процессов, происходящих внутри молекул (внутреннее тушение) и возникающих при взаимодействии молекул между собой, причём сначала вообще никак не конкретизируется структура молекул.

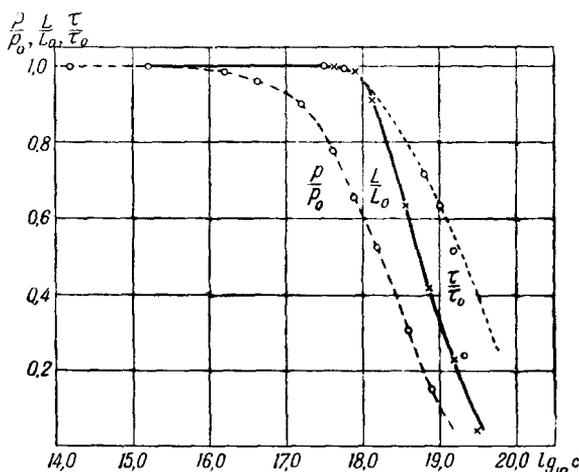


Рис. 7. Изменение степени поляризации  $\frac{P}{P_0}$ , выхода  $\frac{L}{L_0}$  и средней длительности возбуждённого состояния  $\frac{\tau}{\tau_0}$  в растворе флуоресцеина в глицерине при комнатной температуре.

Для рассмотрения концентрационной деполаризации, конечно, пришлось всё же несколько конкретизировать модель молекулы. В качестве таковой был принят, в согласии с опытными данными, диполь.

Это приводит к следующей формуле (формула (57), стр. 157) для степени поляризации при малых концентрациях:

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_0} + \frac{1}{P_0} \frac{3 - P_0}{3} \frac{c \tau_0}{k^2}, \quad (4)$$

где  $\frac{1}{k^2}$  обычно имеет смысл скорости возрастания сферы действия молекулы после начала резонансной связи между соседними молекулами, т. е. скорости установления резонансной связи: Эта формула согласуется с экспериментальными данными Б. Я. Свешникова и П. П. Феофилова.

Миграция энергии должна приводить к деполаризации излучения в период затухания люминесценции. Здесь предсказания теории

оказались в хорошем согласии с результатами опытов А. Н. Севченко и М. Д. Галанина.

В книге приведены соответствующие экспериментальные данные и подробно обсуждены детали наблюдающихся закономерностей.

Теория концентрационного тушения не пользуется конкретной моделью молекулы вообще. Ясно, что миграция энергии должна приводить к усилению тушения. В книге даны промежуточные выкладки, приводящие к формуле для концентрационного тушения. Эта формула в общем виде содержит пять постоянных. С. И. Вавилов пишет: «Эти постоянные — эмпирические, но они не произвольны, а совершенно определённые, так как входят в выражения других независимых физических процессов» (имеются в виду процессы затухания и деполяризации. — *В. Ф.*) (стр. 172). В книге приведён большой экспериментальный материал, накопленный сотрудниками С. И. Вавилова и количественно подтверждающий теорию концентрационного тушения, основанную на представлении о миграции энергии.

В рамках той же теории укладывается и «нетривиальное» тушение посторонними поглощающими веществами. Это тушение возникает в результате индуктивной резонансной связи между светящимися молекулами и молекулами тушителя. Поэтому тушение сопровождается сокращением продолжительности жизни излучающих молекул.

Пожалуй, наиболее изящными опытами, подтверждающими представление о миграции энергии, являются опыты по деполяризации и тушению люминесценции в «одномерной» среде (стр. 187—189).

Для этих опытов было использовано «пористое» стекло И. В. Гребенщикова. В этом совершенно прозрачном стекле имеются длинные поры диаметром порядка  $10^{-6}$  см. Стекло пропитывается люминесцирующим раствором. Расстояние между молекулами люминофора при тушении как раз такого же порядка. «Большинство растворённых молекул, поэтому, расположится одна за другой „одномерно“ в виде чётки» (стр. 187).

В «одномерном» случае каждая молекула имеет меньше соседей, чем в нормальном, трёхмерном, поэтому тушение должно быть меньше. Кривые рис. 8 (рис. 60, стр. 188) показывают, что это действительно так.

«„Одномерные“ опыты... могут рассматриваться как новый, очень своеобразный довод в пользу теории резонансной миграции энергии возбуждения» (стр. 189).

Заканчивается книга описанием экспериментов С. И. Вавилова и М. Д. Галанина по исследованию поглощения в тонких люминесцирующих слоях. В соответствии со сказанным выше, они нашли аномалию поглощения, связанную с взаимодействием близких молекул.

Действительно, было обнаружено, что «коэффициент селективного поглощения на расстояниях, меньших  $\lambda$ , от излучающих молекул начинает возрастать и тем больше, чем меньше толщина... Новое обнаруженное на опыте явление незначительно по своей

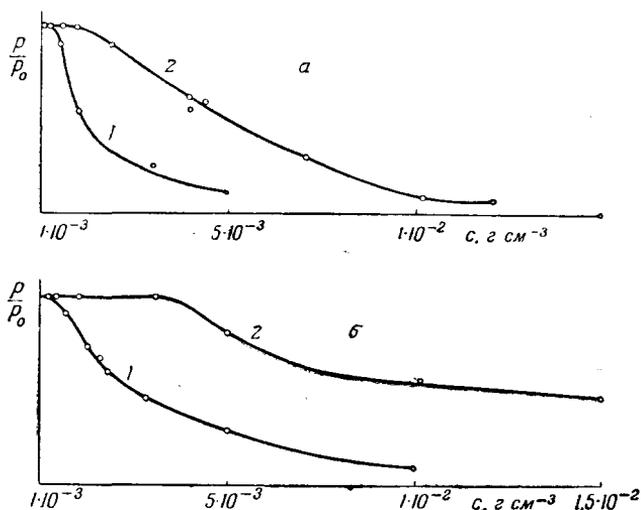


Рис. 8. Концентрационное тушение растворов кислых красителей: *a* — водного раствора флуоресцеина; *б* — щелочного раствора натриевой соли перилентетракарбоновой кислоты. 1 — тушение в кювете; 2 — тушение в пористом стекле (по измерениям Ф. М. Пекерман).

величине, но имеет принципиальное значение — оно как бы перебрасывает мост между обычной оптикой с разделённым источником и средой и оптикой излучающей и поглощающей среды, когда понятия источника и среды трудно разделимы» (стр. 193).

Наш обзор, конечно, не может передать всё богатство содержания книги С. И. Вавилова.

Перед нами, безусловно, совершенно новые главы оптики. Старые, привычные понятия приобретают иной, более глубокий смысл, и возникают новые проблемы. Становятся ясными границы старой «линейной» оптики и открываются пути дальнейшего развития оптики.

Книга в целом представляет одновременно и итог и программу дальнейших действий.

К сожалению, реализация этой программы будет совершаться уже без её автора.