1952 г. Сентябрь *Т. XLVIII, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ УЧЕНИЯ О СВЕТЕ

(О книге С. И. Вавилова «Микроструктура света»)

П. П. Феофилов

Многовековая история развития учения о свете — история борьбы противоположных тенденций, порождённых внутреннепротиворечивой природой света, невозможностью создания наглядной механической модели светового процесса. Поучительные уроки этой истории не позволяют считать, что синтез корпускулярных и волновых представлений, формально осуществляемый современной физикой, не потребует дальнейшего пересмотра взглядов на природу света, что новые явления не поставят физиков перед необходимостью изменить не только отдельные положения современного учения о свете, но и его существо.

Устанавливая законы распространения света, его отражения и преломления, его действия на вещество, учёные не могли не задумываться над вопросами о природе света, не могли не попытаться создать наглядную картину светового процесса. И тут безупречно точные законы оптики, оставаясь сами по себе несомненными, вступали в непреодолимые противоречия друг с другом.

Для древних греков, положивших начало геометрической оптике, было вполне достаточно представлений о зрительных лучах, исходящих из глаз. Эпикур и Лукреций создали столь же фантастические, поэтические представления о «слепках» — материальных образах, отделяющихся от предметов и летающих в пространстве. В идеалистической философии Аристотеля свет утратил черты материальности, которыми его наделяли древние атомисты, однако остался связанным с призрачной средой. В учении стоиков глаз приводил при зрении окружающий воздух в состояние натяжения, распространяющегося шаровыми волнами с центром в зрачке глаза. Хотя эти примитивные догадки, равно как и мистические высказывания учёных средневековья, представляют для современной

физики лишь исторический интерес, уже в них можно усмотреть истоки альтернативы корпускулы — волны, вставшей перед физиками в период бурного развития оптики, начавшегося в XVII веке. Это развитие, начало которому положили Декарт, Гримальди, Гук, Гюйгенс, Ньютон, Ломоносов, протекало под знаком острой борьбы корпускулярных представлений, естественно входивших в общую механическую картину мира, казавшуюся единственно приемлемой, и волновых теорий, неопровержимым аргументом в пользу которых были открытия явлений интерференции и диффракции. Ньютон, не высказываясь с определённостью в пользу той или иной теории света, несомненно склонялся в сторону корпускул, хотя и предлагал в полемике с Гуком компромиссную гипотезу, основанную всё на той же механической картине. Борьба обострилась ещё сильнее в XVIII — XIX веках, когда каждое новое открытие заставляло склоняться в ту или иную сторону. Удар, нанесённый корпускулярной теории интерференционными опытами Юнга и Френеля, и невозможность последовательного развития механических волновых представлений при недоказанности существования эфира, привели к убеждению в тщетности попыток создания чисто механической теории света. Возможность построения волновой теории света, не нуждавшейся в вещественной среде, была найдена в электродинамике, позволившей Максвеллу развить электромагнитную теорию светового процесса. С новой остротой борьба волновых и корпускулярных представлений протекала в нашем веке в связи с созданием теории квант, требовавшей прерывности светового потока.

В наше время ни у кого нет сомнений в невозможности построения исчерпывающей теории света на основе только волновых или только корпускулярных представлений. Уже делаются попытки создания единой теории света, основанной на квантовой электродинамике. Однако эта теория носит чрезмерно отвлечённый и формальный характер и, несмотря на достаточную общность и математическую обоснованность, не может удовлетворить физика, ищущего конкретизации представлений. Физику-экспериментатору, создающему картину явления прежде всего на основе опыта, гораздо ближе путь глубокого анализа и осмысливания отдельных явлений, в которых выступает та или иная сторона природы света, явлений, в которых вскрывается противоречивость этой природы, явлений, в которых обнаруживается единство противоречивых свойств света.

Этот путь может показаться не столь прямым, как путь создания единой теории, хотя бы формально объединяющей сложившиеся представления о природе света, однако он ничуть не менее плодотворен и совершенно необходим для углубления и конкретизации наших представлений о свете. Этот путь позволяет обнару-

жить в оптических явлениях стороны, которые оставались либо незамеченными, либо оказываются просто неожиданными. Глубокий анализ явлений оптики позволяет не только по-новому понять общенаучное значение отдельных фактов, давно известных или ставших достоянием науки лишь в последние годы, но и наметить новые пути развития учения о свете *).

Блестящий пример такого анализа дал в своей последней книге «Микроструктура света» крупнейший советский учёный академик С. И. Вавилов. Эта книга совместно с великолепным образцом популяризации науки — книгой «Глаз и Солнце» — удостоена в 1952 г. Сталинской премии 1-й степени.

Не будет преувеличением сказать, что в этой книге, обобщающей на основе материалистической диалектики результаты многолетних исследований С. И. Вавилова и его сотрудников по различным вопросам физической оптики, заложены основы и намечены пути развития совершенно нового направления в учении о свете.

Не случайно, что первая из трёх частей книги посвящена изложению данных, относящихся к корпускулярному аспекту оптики, вторая — явлениям, в которых наиболее отчётливо проявляются волновые свойства света — вторая сторона его противоречивой природы, и в третьей части даётся синтетическая картина некоторых своеобразных случаев взаимодействия света и вещества, этих двух форм проявления материи, которые с давних пор было принято противопоставлять друг другу.

Этот диалектический принцип построения книги, подсказанный всей историей развития оптики, чрезвычайно характерен для С. И. Вавилова, отличительной чертой научного творчества которого было стремление к философскому анализу, обобщению и обоснованию результатов, добываемых наукой. Это стремление проявилось и в собственных научных исследованиях С. И. Вавилова, обладавшего редким даром выбирать среди множества задач современной физики наиболее основные и принципиальные и, находя им оригинальные и остроумные решения, указывать пути и перспективы развития целых направлений. Как бы подкупающе просты ни были порой ставившиеся и решавшиеся им задачи, за ними всегда скрывалась глубокая мысль, приводившая к поражавшим своей широтой следствиям и обобщениям.

---

*) Было бы наивно думать, что этот путь предполагает возможность создания исчерпывающей наглядной картины светового процесса. Такая попытка, сводящаяся в конечном счёте к попытке возрождения механических теорий света, заведомо обречена на неуспех. Борясь с излишним формализмом многих теоретических построений, С. И. Вавилов всегда высоко оценивал роль математической гипотезы как метода исследования. При этом, однако, вполне закономерно стремление придать в той мере, в какой это возможно, конкретно-физический, наглядный смысл математическим построениям.

Разделение книги на три части отнюдь не является механическим разделением на три не связанные друг с другом группы явлений. В ряде мест книги отчётливо показывается взаимопроникновение противоречивых свойств света и специально поставленные опыты наглядно демонстрируют неразрывное единство этих свойств.

Основная идея книги заключается в том, что привычные представления оптики, характеризующие источники света и световые потоки их энергией, спектром и состоянием поляризации, оказываются недостаточными при переходе к исчезающе малым мощностям световых потоков, при рассмотрении элементарных излучающих систем и развития процесса излучения во времени. Своеобразные явления, наблюдаемые при этом, выходят за круг обычной оптики, образуя специфическую область оптики элементарных процессов — «микрооптику», отличающуюся от обычной оптики — «макрооптики», по меткому выражению С. И. Вавилова, в некоторых отношениях так же, как молекулярная теория вещества отличается от термодинамики.

В отличие от макрооптики, история развития которой насчитывает века, микрооптика представляет плод новейших успехов физики, и её развитие было невозможно без квантовой теории, без глубокого проникновения в мир микроявлений, столь характерного для современной физики. Отдельные «микрооптические» явления были известны, разумеется, с давних пор, однако как область знаний микрооптика только начинает определяться и «Исследования и очерки» С. И. Вавилова намечают пути её развития. Эти пути заключаются в изучении проявлений прерывистой, квантовой структуры светового потока при предельно малых мощностях, в изучении «микроскопического» механизма интерференционных явлений, в изучении элементарных актов испускания и поглощения света в неизвестных макрооптике явлениях, свидетельствующих о невозможности рассматривать элементарные источники света изолированно от среды, в которой они находятся.

Единый микрооптический подход к анализу отдельных явлений позволяет по-новому осмыслить их место в общей системе знаний и указать новые пути развития оптики, открывающиеся в связи с общим развитием современной физики.

«Микроструктура света» ценна не только тем, что в ней очерчен круг вопросов, составляющих новое направление в развитии учения о свете. Эта книга — итог многолетнего научного творчества крупнейшего учёного и, читая её, можно проследить, как из небольших, казалось бы, задач вырастают большие проблемы, как получают естественное обобщение факты, казавшиеся разрозненными, к каким неожиданным и важным следствиям может привести новый подход к давно известным и даже

«тривиальным» явлениям. Книга даёт образцы оригинально задуманных и остроумно осуществлённых экспериментов, учит ставить глубокие задачи и находить им простые решения. В то же время книга С. И. Вавилова на ряде блестящих примеров анализа данных физического эксперимента с точки зрения материалистической диалектики учит творческому применению положений марксистско-ленинской философии к явлениям природы.

1. КВАНТОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ СВЕТОВОГО ПОТОКА — КОРПУСКУЛЯРНЫЙ АСПЕКТ МИКРООПТИКИ

Современной физике едва ли известны опыты, вскрывающие квантовую природу света с такой наглядностью, с такой очевидностью (в буквальном смысле слова), как опыты С. И. Вавилова по визуальному наблюдению квантовых флуктуаций светового потока.

Беспорядочность микроструктуры светового потока, обусловленная статистическим характером процессов испускания и квантовой, прерывистой природой света, с неизбежностью приводит к существованию статистических отклонений от средних значений (флуктуаций) как интенсивности светового потока, так и других его свойств (поляризации, спектрального состава и т. п.). Эти флуктуации определяются, с одной стороны, беспорядочностью молекулярных движений светящейся среды («классические» флуктуации) и, с другой стороны, дискретностью и спонтанной независимостью актов испускания отдельных квантов света («квантовые» флуктуации). В то время как классические флуктуации могут быть обнаружены лишь в световых потоках, испускаемых источниками, обладающими весьма высокой температурой ($\approx 30\,000°$ и выше), квантовые флуктуации должны, естественно, наблюдаться для любых световых потоков, при условии, что средняя мощность этих потоков достаточно мала.

Для наблюдения столь слабых световых потоков необходимы приёмники лучистой энергии, превосходящие по своей чувствительности и устойчивости лучшие современные фотоэлектрические устройства. Таким приёмником оказался человеческий глаз, замечательные свойства которого, неоднократно оказывавшие науке неоценимые услуги, позволяют обнаружить световые потоки столь малой средней мощности, что в них становятся ощутимыми флуктуации, обусловленные квантовой структурой света.

Сетчатка глаза человека может воспринимать чрезвычайно малые порции световой энергии, состоящие всего лишь из нескольких десятков квантов, причём минимальное (пороговое) число квантов, способное вызвать зрительное ощущение, оказывается достаточно

определённым для данного наблюдателя. Таким образом, глаз, наблюдающий слабые световые вспышки, средняя величина светового потока в которых близка к этому пороговому значению, будет воспринимать те из них, яркость которых превышает вследствие статистического характера излучения пороговую яркость, и не будет замечать те, яркость которых ниже этого порога. Соответствующая статистическая обработка данных относительно числа зарегистрированных и пропущенных вспышек при различной средней величине светового потока даёт возможность определить среднее число фотонов, вызывающее минимальное зрительное ощущение, и сравнить теоретически ожидаемые флуктуации с наблюдаемыми на опыте.

За скупыми строками книги, излагающими результаты наблюдений, скрывается огромная работа коллектива сотрудников С. И. Вавилова, накапливавшего путём трудоёмких и утомительных измерений экспериментальные данные, необходимые для статистической обработки. Результаты опытов показали, что наблюдаемые флуктуации соответствуют тем, которые следовало ожидать на основе представлений о квантовой структуре светового потока. Квантовую природу света удалось наблюдать «воочию»!

Значение опытов С. И. Вавилова по визуальному наблюдению квантовых флуктуаций отнюдь не ограничивается наглядностью, с которой они демонстрируют квантовую структуру светового потока.

Уже в самом начале исследований стало выясняться их значение для проблем физики и физиологии зрительного процесса. Метод квантовых флуктуаций позволил определить спектральную чувствительность сетчатки глаза как таковой, вне зависимости от поглощения света в расположенных перед ней глазных средах.

Наличие второго максимума чувствительности сетчатки в ультрафиолетовой части спектра, обнаруженное в этих опытах, было подтверждено позднее наблюдениями спектральной чувствительности глаза, лишённого хрусталика.

Изучение квантовых флуктуаций света визуальным методом дало также возможность получать новые данные для решения сложных вопросов о коэффициенте использования глазом падающей на него световой энергии, о взаимодействии палочек и колбочек в условиях порога чувствительности, о фотохимических процессах в сетчатке и других тонких вопросов физиологии зрения.

В самое последнее время начинает выясняться, что квантовые флуктуации светового потока могут сказываться на зрительных функциях и при сравнительно высоких яркостях. Ряд основных физиологических закономерностей зрительного процесса удаётся вывести, исходя из флуктуационных представлений. Можно надеяться, что совместные усилия физиков, физиологов и светотехников, основанные на развитии идей С. И. Вавилова, при-

ведут к созданию совершенно новой флуктуационной теории зрения *).

Метод флуктуаций имеет большое познавательное значение не только для физиологии зрения, но и для физики светового процесса, позволяя с особенной наглядностью вскрыть корпускулярно-волновую двойственность световых явлений. Об этом гносеологическом значении метода флуктуаций убедительно свидетельствуют опыты С. И. Вавилова по наблюдению флуктуаций когерентных пучков, флуктуаций поляризации и статистической структуры интерференционного поля.

Корпускулярная теория встречается с непреодолимыми трудностями при попытках интерпретации явлений интерференции когерентных пучков предельно малой интенсивности. Волновая теория совершает, как известно, без труда переход к сколь угодно слабым световым потокам. В опытах С. И. Вавилова, наблюдавшего флуктуации в двух когерентных пучках, полученных обычным путём расчленения первичного пучка, было установлено, что флуктуации в обоих пучках происходят совершенно независимо друг от друга. Это обстоятельство свидетельствует о том, что последовательное проведение волновых представлений также терпит крах, и что путь к созданию единой картины явления лежит через синтез корпускулярных и волновых представлений.

К этим опытам примыкают опыты по исследованию статистической структуры интерференционного поля при исчезающе малых интенсивностях световых пучков. С точки зрения чисто корпускулярных теорий следовало бы ожидать, что при таких интенсивностях интерференционная картина будет исчезать, поскольку световой квант, прошедший через одну из щелей интерферометра, не будет иметь партнёра, прошедшего через вторую щель. Опыт показал, что в то время как в светлых интерференционных полосах наблюдаются закономерные флуктуации, тёмные полосы продолжают оставаться тёмными и при исчезающе малых мощностях светового потока. Таким образом в микрокартине интерференционного процесса проявляется определённая регулярность, сказывающаяся в том, что статистика разыгрывается только в светлых полосах. При экранировании одного из пучков интерференционная картина исчезала и флуктуации в отдельных участках поля происходили независимо.

---

*) Работы С. И. Вавилова по визуальному наблюдению квантовых флуктуаций вызвали ряд работ зарубежных авторов, в сущности лишь повторивших его результаты. Некоторые из этих авторов (в том числе известный американский оптик Гехт и другие) пытались вначале игнорировать, а затем совершенно необоснованно критиковать работы С. И. Вавилова. На страницах книги С. И. Вавилов показывает несостоятельность этой критики и решительно протестует против «такого отношения к работам других авторов, необычного в нормальных научных публикациях».

Точно так же независимыми оказались флуктуации в двух взаимно-перпендикулярных световых пучках, полученных расщеплением пучка естественного света с помощью призмы Волластона. Эти опыты показывают, что естественный свет при достаточно малых интенсивностях поляризован в каждый момент различным образом, т. е. обладает флуктуациями состояния поляризации.

Обобщение результатов этих опытов привело С. И. Вавилова к формулировке общего флуктуационного принципа: «каждый изолированный каким-угодно способом световой пучок при достаточно малой мощности проявляет флуктуации интенсивности, происходящие совершенно самостоятельно и независимо от колебаний в каком-либо другом пучке».

Противоречивость светового процесса обнаруживается во всех этих опытах с полной очевидностью. Показывая тщетность метафизического расчленения корпускулярных и волновых свойств материи и доказывая органическую слитность этих свойств и их взаимопроникновение, опыты С. И. Вавилова могут служить блестящей иллюстрацией одного из основных положений диалектического материализма.

Мы уже говорили, что в световом потоке, испускаемом источником с достаточной высокой температурой ($>30\,000°$), наряду с квантовыми должны обнаруживаться «классические» флуктуации, определяемые свойствами источника. Пути развития исследований классических флуктуаций только намечены С. И. Вавиловым, указавшим, что их наблюдение может, по крайней мере принципиально, позволить измерять температуру очень горячих звёзд.

Развивая эту мысль С. И. Вавилова, можно утверждать, что два световых потока, неразличимые с точки зрения макрооптики, т. е. обладающие тождественными интенсивностью, спектром и поляризацией, но полученные один от высокотемпературного источника, а второй от низкотемпературного (спектральный состав может быть уравнен, например, с помощью светофильтра) должны отличаться по характеру и величине флуктуаций. В первом пучке (если температура источника, посылающего этот пучок, достаточно высока) наряду с квантовыми должны наблюдаться и классические флуктуации.

Таким образом, величина флуктуаций может рассматриваться как новая характеристика светового потока.

2. ГРАНИЦЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРИНЦИПА СУПЕРПОЗИЦИИ. «НЕЛИНЕЙНОСТЬ» В ОПТИКЕ

Принцип полной суперпозиции энергии во всех точках пространства, в котором пересекаются световые пучки, идущие от различных источников, представлялся очевидным во всех классических оптических теориях. Вытекающая из этого принципа линейность урав-

нений оптики казалась её незыблемой основой. Декарт, Ньютон, Гюйгенс и Ломоносов исходили во всех своих теоретических построениях из несомненности принципа суперпозиции. Несоблюдение этого принципа должно было бы приводить к нарушению независимого прохождения светового пучка в пространстве, в котором распространяются другие световые пучки, и вызывать явление «саморассеяния» света. Небезынтересно отметить, что в отсутствии такого «саморассеяния» Ломоносов видел убедительный аргумент против корпускулярной теории света, согласно которой при пересечении мощных световых пучков должно было бы происходить «в лучах замешательство». Защитники корпускулярной теории искали выход в предположении о чрезвычайной малости световых корпускул.

Открытие квантового характера световых явлений вынудило снова поставить вопрос о принципе суперпозиции и о линейности уравнений оптики. В ряде работ делались попытки обнаружить «саморассеяние» света, попытки, неизменно дававшие отрицательный результат. Однако границы эмпирической точности принципа суперпозиции оставались достаточно неопределёнными. Смело поставленные опыты С. И. Вавилова, проводившиеся им ещё в 20-х годах, показали, что эти границы чрезвычайно широки в пространстве, лишённом вещества. Убедившись в тщетности попыток установить границы выполнения принципа суперпозиции в условиях земных опытов, С. И. Вавилов произвёл оценку этих границ по яркости солнечной короны, наблюдаемой в пространстве, в котором пересекаются пучки света огромной интенсивности. При этом оказалось, что даже если приписать всю солнечную корону «саморассеянию» света, эффективное поперечное сечение кванта оказывается чрезвычайно малым — всего лишь около 10^{-40} *см*^{2}. Хотя современная теория света, формально объединяющая корпускулярные и волновые представления, допуская принципиально возможность нарушения линейности в вакууме *), даёт для поперечного сечения квантов величину, на 30 порядков (!) меньшую, чем эта, опыты и соображения С. И. Вавилова не утратили своего значения до сих пор.

Если границы применимости принципа суперпозиции в пространстве, лишённом вещества, лежат далеко за пределами экспериментальных возможностей, то при распространении света в веществе квантовый характер микроскопических процессов может приводить к очень существенному нарушению «линейности».

Ещё в 1920 г., в период становления теории квантов, С. И. Вавилов опубликовал результаты опытов по проверке независимости

*) Эти нарушения линейности обусловлены возможностью образования из «жёсткого» фотона пары электрон — позитрон.

коэффициента поглощения вещества от интенсивности света, проходящего через вещество. Эти опыты были проведены в рекордно широких пределах — интенсивность света изменялась в 10^{20} раз — и показали, что коэффициент поглощения не зависит от интенсивности света. В настоящее время этот результат может показаться тривиальным, однако в своё время он оказался убийственным для гипотезы о непрерывном характере поглощения и квантовом характере излучения, гипотезы, выдвигавшейся создателем теории квантов — М. Планком. Эта гипотеза приводила к выводу о сильном возрастании поглощения в области предельно малых интенсивностей света и обнаруженное в опытах С. И. Вавилова отсутствие такого возрастания свидетельствовало о том, что и поглощение также имеет квантовый характер. Попытка Планка примирить столь примитивным образом волновые и корпускулярные представления оказалась несостоятельной.

Квантовый характер процессов поглощения и испускания и конечная продолжительность пребывания молекул в возбуждённых состояниях заставляют ожидать отклонений от «линейности» в другом предельном случае — при очень больших интенсивностях проходящего света. В опытах С. И. Вавилова эти отклонения не наблюдались, так как длительность возбуждённого состояния молекул красителей, с которыми производились опыты, не превышала 10^{-8} сек. При столь малых продолжительностях число возбуждённых молекул, спектр поглощения которых, очевидно, должен быть отличен от спектра поглощения невозбуждённых, составляло даже при наибольших применявшихся интенсивностях лишь ничтожную долю общего числа молекул. Однако уже в случае уранового стекла, длительность возбуждённых состояний которого имеет величину порядка 10^{-4} сек., С. И. Вавилову и В. Л. Левшину удалось наблюдать отклонения от «линейности», выразившиеся в уменьшении поглощательной способности при очень интенсивном проходящем свете. У так называемых фосфоров, имеющих длительности возбуждённых состояний порядка секунд и более, значительные нарушения «линейности» могут без труда наблюдаться уже при сравнительно небольших интенсивностях, причём в ряде случаев эти нарушения настолько велики, что могут быть положены в основу особых «абсолютных фотометров». Построенный в своё время по идее С. И. Вавилова «нелинейный» фотометр можно рассматривать как первую реализацию нового оригинального принципа фотометрии.

Нарушение «линейности», составляющей один из основных принципов обычной оптики, позволило С. И. Вавилову поставить задачу и наметить пути развития нового направления — «нелинейной» оптики, критически рассматривающей постоянство таких характеристик вещества, как поглощение, дисперсия, двойное

лучепреломление, дихроизм и т. п. Несмотря на то, что с «нелинейной» оптикой постоянно приходится иметь дело и при решении задач астрофизики, когда речь идёт о колоссальной плотности световой энергии внутри звёзд, и в скромных условиях лаборатории при изучении явлений люминесценции, строгий математический аппарат для решения «нелинейных» оптических задач до сих пор отсутствует. И С. И. Вавилов ставит перед физиками задачу создания такого аппарата.

3. ВОЛНОВОЙ АСПЕКТ МИКРООПТИКИ

а) Микрооптическое рассмотрение общих задач интерференции

Во второй части книги С. И. Вавиловым реализована неочевидная на первый взгляд возможность микрооптического исследования явлений, определяемых волновыми свойствами света и в первую очередь явлений интерференции. Оригинальный конкретно-физический, а не формально-математический подход к рассмотрению явлений интерференции позволил С. И. Вавилову сказать новое слово и в этой классической области оптики.

При классическом рассмотрении явлений интерференции принято оперировать с бесконечно протяжёнными во времени волнами и бесконечно малыми источниками, испускающими изотропные сферические волны. Эти упрощения и ограничения становятся недопустимыми при переходе к реальным элементарным излучающим системам с конечной продолжительностью излучения, к реальным условиям интерференционных опытов с неизбежным ограничением световых пучков, т. е. при переходе к микроскопическому рассмотрению интерференционных задач.

В мастерском изложении основ учения об интерференции, данном в «Микроструктуре света», чрезвычайно характерно для С. И. Вавилова стремление строить рассуждения на конкретных, ощутимых образах. Благодаря этому читатель вынужден задумываться над деталями механизма интерференционных явлений, ускользающими в обычном изложении. Так, здесь совершенно по-новому рассмотрен вопрос о невозможности осуществления идеальных монохроматических пучков, по-новому рассмотрен общий случай интерференционной картины, возникающей как сочетание интерференции параллельных и антипараллельных волн и бегущей волны, не интерферирующей ни с чем. Очень существенно проведённое С. И. Вавиловым рассмотрение влияния на интерференционную картину размеров источников, посылающих интерферирующие пучки, а также диффракционной структуры интерференционного поля, необходимость учёта которой

вытекает из неизбежного в реальных интерференционных опытах диафрагмирования световых пучков. Полученные результаты имеют прямое отношение к теории интерференционных приборов.

По-новому поставив вопрос о когерентности световых пучков, С. И. Вавилов высказал предположение, что в принципе когерентные световые пучки могут быть получены и от раздельных элементарных источников при наличии взаимодействия между источниками. Необходимо лишь, чтобы источники были расположены достаточно близко друг к другу и чтобы средняя продолжительность процесса излучения значительно превышала период световых колебаний. Это предположение, основанное на представлении о резонансном взаимодействии источников, теснейшим образом связано со следствиями из совокупного рассмотрения источника света и среды, проведённого в третьей части книги. Опыты, задуманные С. И. Вавиловым для экспериментальной проверки этого предположения, ещё ждут своего осуществления.

Замечательны своей простотой и полны глубокого смысла опыты С. И. Вавилова по наблюдению влияния среды на интерференционные явления. Результаты этих опытов, кажущиеся на первый взгляд парадоксальными, позволяют говорить о нелепом с обычной точки зрения явлении вращения плоскости поляризации неполяризованного света. Если заставить интерферировать два когерентных естественных пучка, а затем ввести на пути одного из них среду, например среду, поворачивающую плоскость поляризации линейно поляризованного света на 90°, то интерференционная картина исчезнет, хотя оба пучка попрежнему остаются когерентными и естественными. Это связано с тем, что для каждого элементарного излучения (фотона в корпускулярной трактовке) плоскости поляризации встречающихся лучей оказываются повёрнутыми друг относительно друга на 90°, что делает невозможной интерференцию. Таким образом интерференция позволяет вскрыть изменения внутренней структуры естественного пучка, недоступные обычным методам анализа света, основанным на наблюдении интенсивности, частоты и состояния поляризации. Аналогичный опыт может быть произведён с пластинкой в полволны, помещаемой на пути одного из интерферирующих естественных пучков. Пластинка в полволны также оставляет естественный свет естественным, однако вносит в него закономерные изменения, которые могут быть обнаружены интерференционным сравнением с другим когерентным естественным пучком, не претерпевшим таких изменений.

В этих опытах С. И. Вавилова, углубляющих понятие о естественном свете, можно видеть яркий пример взаимопроникновения противоположностей: естественный свет одновременно и неполяризован и поляризован.

Особенно отчётливо выявляется эвристическое значение микрооптического подхода к интерференционным явлениям при рассмотрении зависимости характера интерференционной картины от природы элементарных излучателей и при исследовании излучения электронов, распространяющихся в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света.

б) Интерференция и природа элементарных излучателей

В классическом учении об интерференции не возникал вопрос об анизотропии светового поля отдельных элементарных излучателей, о направленности их излучения. Он не был существенен, поскольку всегда рассматривалась интерференция лучей, получаемых при расщеплении одного светового пучка посредством отражения или преломления (интерференция Ньютона) или же распространяющихся от источника под малыми углами (интерференция Френеля).

Нетрудно понять, однако, что если снять эти ограничения и заставлять интерферировать световые пучки, исходящие от элементарного источника под широкими углами, то свойства пространственной анизотропии источника будут проявляться в характере интерференционной картины. Как известно, элементарные излучатели различной мультипольности (электрические и магнитные диполи, квадруполи и т. д.) обладают различным пространственным распределением излучения и, следовательно, должны давать различную картину при широкоугольной интерференции. Хотя наблюдение широкоугольной интерференции производилось и ранее*), однако до С. И. Вавилова никто не обращал внимания на возможность привлечения получаемых результатов для определения мультипольности элементарных излучателей.

Произведённые С. И. Вавиловым расчёты характера интерференционного поля при различных углах между интерферирующими пучками показали, что видимость интерференционных полос и степень их поляризации качественно различны для источников, построенных из различных элементарных излучателей. Таким образом, анализ интерференционной картины позволяет выявить характерные микроструктурные особенности элементарных излучателей. Этот результат показывает возможности интерференции как метода исследования. Направленность элементарного излучения обычно не учитывается, так как хаотичность распределения излучателей в реальных источниках усредняет картину, однако

*) Опыты Шредингера над широкоугольной интерференцией, производившиеся им в 1920 г., ставились с целью разрешить кажущееся противоречие между всесторонним излучением классических осцилляторов и направленностью траектории отдельных фотонов. Сейчас, разумеется, такая постановка вопроса имеет лишь исторический интерес.

мультипольная микроструктура светового пучка может быть выявлена в интерференционных опытах.

Неизменный интерес С. И. Вавилова к изысканию экспериментальных возможностей исследования мультипольной природы элементарных излучающих и поглощающих систем привёл его и к другому оригинальному методу, также основанному на анизотропии пространственного распределения излучения, т. е. также относящемуся в сущности к микрооптике. Этот метод, позволяющий определять одновременно природу как излучающей, так и поглощающей систем люминесцирующих объектов, состоит в изучении зависимости поляризации света люминесценции от направления наблюдения и положения электрического вектора возбуждающего света. Пространственное распределение поляризации оказывается специфическим для излучателей различных типов и позволяет определять их природу.

Рассматривая работы С. И. Вавилова в области квантовых флуктуаций, мы указывали, что к обычным характеристикам светового потока — интенсивности, спектру, поляризации и направлению — может быть добавлена новая характеристика — величина флуктуаций светового потока.

Работы С. И. Вавилова в области изыскания методов экспериментального изучения природы элементарных излучателей в сложных молекулярных системах приводят к новому обогащению понятия о световом потоке. К указанным характеристикам светового потока должна быть добавлена ещё одна существенная характеристика — природа элементарных излучателей светового пучка. Разработанные С. И. Вавиловым методы продолжают до сих пор оставаться единственным средством экспериментального определения этой характеристики для излучений со сплошным спектром.

в) Явление Вавилова-Черенкова. Оптика «сверхсветовых» скоростей

В 1933 г. П. А. Черенков, работавший под руководством С. И. Вавилова, исследовал универсальное видимое свечение чистых жидкостей под действием γ-лучей радия. Анализ своеобразных свойств этого свечения привёл С. И. Вавилова к выводу о том, что мы имеем здесь дело с новым видом излучения. Дальнейшие исследования показали, что это излучение сопровождает распространение электронов в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света.

Путь, которым С. И. Вавилов пришёл к заключению о том, что наблюдаемое свечение не является, как могло показаться на первый взгляд, обычной γ-люминесценцией, очень поучителен и существенен для анализа научного творчества

С. И. Вавилова, поэтому следует остановится на нём несколько подробнее.

Примером того, как последовательно и логически безупречно развивались С. И. Вавиловым представления об отдельных физических понятиях и величинах, может служить длительность возбуждённых состояний молекул.

В развиваемой С. И. Вавиловым ещё в 20-е годы теории поляризованной люминесценции важную роль играло представление о конечности времени пребывания молекул в возбуждённом состоянии, позволяющей молекулам утрачивать первоначально возникшую ориентацию, в результате чего свечение деполяризуется. Позднее представление о длительности возбуждённых состояний было введено в теорию тушения люминесценции, разработанную С. И. Вавиловым и его сотрудниками. В этой теории вероятность тушения прямым образом связывалась с длительностью, которая служила основным критерием при классификации видов тушения. Через длительность люминесценции оказалось возможным связать деполяризацию с тушением. В этих основных люминесцентных процессах, определяемых длительностью возбуждённых состояний, не участвует взаимодействие отдельных молекул люминесцирующего вещества. Но перенос основных представлений о кинетике процессов, развивающихся во времени, позволил С. И. Вавилову разработать в 40-х годах теорию влияния концентрации на люминесценцию, речь о которой будет ниже (§ 4). Здесь важно подчеркнуть, что в основе этой теории лежит представление о конечности времени пребывания молекул в возбуждённом состоянии.

Последовательный анализ роли длительности возбуждённого состояния люминесцирующих молекул привёл в 1944 г. С. И. Вавилова к необходимости ввести представление о конечной длительности возбуждённого состояния в определение самого понятия люминесценции. Классическое определение люминесценции как неравновесного процесса излучения, данное ещё Видеманом, требовало ограничений для того, чтобы его можно было привести в соответствие с реально применяемыми в физике представлениями о люминесценции. Видемановское определение страдало чрезмерной широтой, включая такие нелюминесцентные в общепринятом понимании явления, как всевозможные виды рассеяния, отражение, тормозное излучение и т. п. Для отграничения их от люминесценции был необходим дополнительный критерий. Неравновесное излучение, в отличие от равновесного температурного, всегда носит характерные черты излучающего тела или причины, вызвавшей излучение, отражающиеся в спектре, интенсивности, поляризации, пространственной анизотропии и, наконец, длительности свечения. Проанализировав всё многообразие неравновесных излуче-

ний и их свойств, С. И. Вавилов пришёл к выводу, что лишь длительность может служить однозначным критерием для отграничения люминесценции от всех прочих видов неравновесного излучения. Это позволило ему дать известное безупречно строгое определение люминесценции.

Последовательное проведение критерия длительности как основы при классификации видов свечения позволило С. И. Вавилову заподозрить, что наблюдавшееся П. А. Черенковым свечение не входит в круг люминесцентных процессов. Действительно, оно не было подвержено ни тушению, ни деполяризации, т. е. не обладало конечной длительностью. Вскоре обнаружились новые неожиданные свойства свечения: его пространственная направленность, своеобразное состояние поляризации, подверженность влиянию магнитного поля. В результате было открыто новое явление излучения электронов, движущихся со скоростью, превышающей фазовую скорость света в среде, — явление, раскрывающее новые непредвиденные возможности оптики источников, движущихся в вещественной среде со сверхсветовыми скоростями *).

Микрооптический анализ структуры поля интерференции световых волн, возникающих при прохождении сверхбыстрого электрона через среду, позволяет дать элементарную теорию свечения Вавилова-Черенкова, объясняющую своеобразный характер направленности этого свечения. Как известно, при распространении света или электронов в однородной среде излучения света в стороны не происходит, несмотря на то, что каждая точка траектории фотона или электрона может рассматриваться как центр сферических волн. Это связано с интерференцией волн, приводящей к взаимному уничтожению возмущений во всех точках пространства, за исключением точек, лежащих на траектории. Иначе обстоит дело при «сверхсветовой» скорости электронов. В этом случае в результате интерференции будут гаситься все лучи, за исключением лучей, образующих с траекторией электрона определённый угол, зависящий от скорости электронов. В результате излучение окажется, в соответствии с опытом, направленным по конусу.

Интерференционное толкование явления Вавилова-Черенкова приводит к выводу (ещё не проверенному на опыте), что если слой вещества, через который проходит электрон, мал по сравнению с длиной волны, то видимое свечение со своеобразными свойствами должно возникать и при скоростях электронов, не достигающих скорости света.

---

*) Следует заметить, что применение критерия длительности позволило С. И. Вавилову доказать, что наблюдавшееся в 1928 г. в Индии свечение, истолкованное авторами как новый вид рассеяния света, является обычной люминесценцией, обусловленной ничтожными примесями, содержавшимися в излучаемом веществе.

Излагая наряду с интерференционной элементарную корпускулярную теорию излучения сверхбыстрых электронов, С. И. Вавилов подчёркивает, что при этом речь идёт не о двойном объяснении, а что «оба толкования сливаются в одно соответственно двойственной корпускулярно-волновой природе света».

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИСТОЧНИКА И СРЕДЫ

В обычной оптике предполагается, что для решения задач о распространении света в среде достаточно охарактеризовать источник света в отношении его интенсивности, спектра и состояния поляризации и задать постоянные, характеризующие среду— ее показатели поглощения и преломления и величину оптической активности. Подобное макроскопическое описание, игнорирующее взаимосвязь источников света и среды, оказывается недостаточным для объяснения ряда явлений, в частности некоторых явлений во флуоресцирующих растворах.

В противоположность этому микрооптика исходит из представлений об источнике и среде как целом, органически связанном. В третьей части книги С. И. Вавилова показывается, что такой диалектический подход к рассмотрению физических задач позволяет сделать ряд выводов принципиального значения и обнаружить ряд новых явлений, неизвестных обычной оптике.

а) Микрооптика поглощающей среды

Физическую основу предположения макрооптики о возможности независимого рассмотрения источника света и среды составляет допущение, что расстояния между излучающими частицами вещества и частицами, поглощающими и рассеивающими свет, значительно превышает длину волны испускаемого света. Иными словами, макрооптика ограничивает себя процессами, протекающими в «волновой зоне». Такое ограничение оказывается непозволительным при рассмотрении процессов в средах, одновременно испускающих и поглощающих свет, например в макроскопических источниках света или в люминесцирующих средах, где излучающие молекулы окружены другими молекулами (тождественными или чужеродными), способными поглощать испускаемый свет. В этом случае необходимо отказаться от представления о раздельности источника света и среды и перейти к более общему представлению об источнике света и среде, как целом, органически связанном. При этом следует учитывать не только «пассивную» роль удалённых поглощающих частиц, ослабляющих уже сформировавшееся излучение, но и «активное» участие поглощающих частиц, расположенных вблизи излучающей, в формировании

излучения. Эта «активная» роль близлежащих поглощающих частиц проявляется в индуктивной резонансной связи, в которую они вступают с излучающими частицами. В случае люминесцирующих растворов индуктивный резонанс вызывает изменение излучательной способности люминесцирующих молекул и поглощательной способности близлежащих невозбуждённых молекул. Таким образом, наряду с «тривиальными» макрооптическими причинами изменения интенсивности света, возникшего в поглощающей среде и проходящего через неё, должны иметься своеобразные микрооптические причины.

Влияние излучающих молекул на поглощательную способность близлежащих невозбуждённых должно проявляться наиболее сильно при переходе к предельно тонким люминесцирующим слоям и наблюдаться в виде отклонений от закона Бугера, устанавливающего независимость коэффициента поглощения от толщины поглощающего слоя. Опыты по обнаружению этих отклонений от закона Бугера, осуществлённые С. И. Вавиловым с изумительной экспериментальной виртуозностью, показали (в соответствии с ожиданием) возрастание поглощения при сближении молекул. Это возрастание незначительно по величине, но имеет очень большое принципиальное значение — «оно как бы перебрасывает мост между обычной оптикой с разделёнными источником света и средой и оптикой излучающей и поглощающей среды, когда понятия источника и среды трудно разделимы».

б) Индуктивный резонанс и миграция энергии

Наличие индуктивной резонансной связи между молекулами в растворах приводит к тому, что при достаточном сближении молекул, т. е. при достаточной концентрации растворённого вещества, энергия возбуждения, полученная молекулой в результате поглощения кванта света, получает возможность передаваться от возбуждённых молекул к невозбуждённым подобно тому, «как энергия связанных колеблющихся маятников попеременно перекачивается от одного маятника к другому». Энергия возбуждения может, таким образом, мигрировать от молекулы к молекуле, следствием чего может быть ряд своеобразных явлений, в частности явлений в люминесцирующих растворах, где в результате миграции энергии молекула, поглотившая световой квант, и молекула, излучающая его энергию в виде люминесценции, могут оказаться пространственно разделёнными.

В люминесценции давно известно влияние возрастания концентрации растворённого люминесцирующего вещества на все основные характеристики свечения — его спектр, выход, поляризацию и длительность.

Объяснение части этих явлений не встречало никаких трудностей, поскольку они связаны с «тривиальным» влиянием поглощения света люминесценции, проходящего через поглощающую среду. Однако ряд явлений, в частности уменьшение выхода, степени поляризации и длительности послесвечения с ростом концентрации, не удавалось объяснить целиком этим «тривиальным» влиянием — явления наблюдались и в тонких слоях, где влияние повторного поглощения было исключено. Попытки создания физико-химических теорий явления не увенчались успехом.

Непротиворечивое объяснение влияния сближения молекул на характеристики люминесценции было найдено в результате привлечения представлений о миграции энергии возбуждения. Эти представления вошли в учение о люминесценции через квантовую механику с её в значительной степени формальным представлением о резонансе связанных систем. Качественно объясняя явления, теории, основанные на квантово-механических соображениях, решительно расходились с опытом при попытках количественного расчёта. С. И. Вавилов обратил внимание на то, что, в сущности, миграция энергии представляет собой чисто классический эффект, связанный с наличием индуктивного резонанса между возбуждёнными и невозбуждёнными молекулами. Классическая оптика, однако, не учитывала возможности существования этого эффекта. Сознательно отказавшись от слишком детальной конкретизации характера индуктивного взаимодействия молекул и скрыв за эмпирическими постоянными детали механизма миграции энергии, не поддающиеся расшифровке, С. И. Вавилов развил внутренне согласованную феноменологическую теорию влияния концентрации на люминесценцию растворов.

В результате миграции энергии в изотропной среде с хаотически расположенными молекулами люминесцирующего вещества первоначально существовавшая частичная ориентация возбуждённых молекул (вызванная анизотропией отдельных молекул и неизбежной анизотропией возбуждающего пучка света) будет постепенно утрачиваться. В результате этого степень поляризации люминесценции должна уменьшаться по мере развития процесса миграции, т. е. по мере возрастания концентрации люминесцирующего вещества. Совершая миграцию, энергия возбуждения может попадать к молекуле, не способной к излучению, в результате чего свечение тушится. Вероятность такого тушения также, очевидно, должна расти с ростом концентрации. Столь же естественно объясняется сокращение средней длительности возбуждённого состояния по мере роста концентрации люминесцирующего вещества.

Формулы, полученные С. И. Вавиловым на основе этих представлений о процессах, происходящих при миграции энергии

возбуждения в люминесцирующих растворах, полностью согласуются с опытными данными.

Теория, развитая С. И. Вавиловым, представляется очень убедительным примером необходимости рационального ограничения при постановке физической задачи, ограничения, определяемого состоянием наших знаний о деталях изучаемых процессов. Чуждая формализму теории квантово-механического резонанса, она создаёт наглядные представления о процессах, связанных с проявлением миграции энергии, отказываясь на определённом этапе от их дальнейшей конкретизации.

Теория С. И. Вавилова не только объясняет все известные факты, определяемые влиянием концентрации на люминесценцию, но и позволяет предсказывать новые явления. Так, например, было предсказано явление возрастания деполяризации по мере затухания свечения, связанное с тем, что энергия, испускаемая на более далёких стадиях свечения, имеет больше шансов совершать миграцию, приводящую, как мы видели, к деполяризации свечения.

Это явление действительно было обнаружено на ряде объектов различной природы.

Развив теорию концентрационных явлений на основе данных, полученных при изучении люминесцирующих растворов, где индуктивный резонанс осуществляется между химически тождественными молекулами, С. И. Вавилов показал на опыте, что тождественность молекул отнюдь не обязательна для индуктивного резонанса. Энергия возбуждения может мигрировать и между разнородными молекулами, — существенно лишь перекрытие спектра излучения возбуждённой молекулы со спектром поглощения невозбуждённой. Это перекрытие свидетельствует о наличии общих частот у молекул, т. е. о выполнении необходимого условия для возможности резонансного взаимодействия.

Если молекулы второго вещества, находящегося в растворе, не способны к люминесценции, то резонансный перенос энергии к этим молекулам от первично возбуждённых молекул люминесцирующего вещества будет неизбежно сопровождаться тушением.

Микрооптический подход к этому замечательному проявлению взаимодействия источника и окружающей среды позволяет рассматривать тушение люминесценции посторонними поглощающими веществами, как поглощение света, чрезвычайно сильно возрастающее на малых расстояниях от источника.

Если же молекулы второго вещества также способны люминесцировать, то в результате миграции энергии к этим молекулам в люминесценции раствора будет наблюдаться излучение молекул обоих веществ (что может быть без труда обнаружено,

если их спектры различны), несмотря на то, что поглощает возбуждающий свет только одно из них. С. И. Вавилов не успел включить в свою книгу результаты проведённых под его руководством опытов, в которых было установлено, что такая сенсибилизированная люминесценция как результат резонансной миграции энергии действительно имеет место.

Весь комплекс вопросов, рассмотренных С. И. Вавиловым в связи с изучением процесса испускания в поглощающей среде, показывает плодотворность такого подхода, при котором источники и среда рассматриваются не как раздельные элементы оптического процесса, а как неразрывно связанные, взаимодействующие и обусловливающие друг друга.

*

* *

Вопросами, затронутыми в «Микроструктуре света», не ограничивается, разумеется, область микрооптики, как оптики элементарных процессов. Однако основные черты этого нового направления в оптике, возникшего в связи с углублением современной физики в мир микроявлений, намечены в ней достаточно ясно.

Очерченные С. И. Вавиловым новые перспективы развития учения о свете должны быть обстоятельно и глубоко изучены. Плодотворность многих из намеченных им путей очевидна уже и сейчас.

Наряду с единым «микрооптическим» анализом уже решённых задач оптики, наряду с изложением собственных научных результатов С. И. Вавилов ставит в своей книге ряд важнейших принципиальных проблем: необходимость более глубокого, не механического объединения электромагнитной теории света с квантовыми фактами и представлениями, необходимость конкретно-физического истолкования фундаментального явления образования пары электрон—позитрон из γ-фотона, необходимость преодоления формализма и «несводимости» самого классического учения об электромагнитном поле и ряд других проблем, относящихся в сущности к микрооптике. Очень характерно, что большая часть этих проблем связана с преодолением формализма, в значительной мере свойственного многим работам по теоретической физике, формализма, который С. И. Вавилов считал недопустимым.

Абстрактный характер многих построений современной физики требует особенно тесного объединения теории и опыта. В этом отношении «Микроструктура света» является блестящим образцом, показывающим, с одной стороны, какой отчётливый и осязаемый смысл могут приобрести самые, казалось бы, сложные и абстрактные построения теории, и, с другой стороны, какие

глубокие теоретические обобщения могут быть сделаны на основе самых, казалось бы, простых опытов.

Несомненно, что многие из мыслей, высказанных в книге С. И. Вавилова, будут предметом специальных исследований. На замечательной книге крупнейшего учёного-материалиста будут воспитываться поколения оптиков, которые будут учиться по ней смелости и глубине в постановке опытов, умению обобщать наблюдаемые факты, диалектически рассматривая их во взаимосвязи с широким кругом явлений, умению делать далеко идущие выводы, прокладывать новые пути в науке.