СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ
ВАВИЛОВ

1967 г. Январь *Том 91, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ С. И. ВАВИЛОВА

ВКЛАД АКАДЕМИКА С. И. ВАВИЛОВА В УЧЕНИЕ О СВЕТЕ *)

П. П. Феофилов

Чем больше дистанция, с которой мы оглядываемся на творческий путь крупных ученых, тем отчетливее видно то влияние, которое они оказали на путь развития науки. В наш век стремительного развития естественных наук 15-летний срок оказывается достаточным, чтобы проследить, не только как расширяются и углубляются уже сложившиеся направления и представления, но и как брошенные как бы вскользь замечания и мысли, не оформившиеся в виде четких положений, но интуитивно плодотворные, действительно развиваются, конкретизируются и, наконец, разрастаются в целые научные направления. Крупный ученый всегда смотрит в будущее, стремясь разглядеть контуры и пути развития будущей науки. Таким ученым был С. И. Вавилов. Будучи в течение многих лет научным руководителем Оптического института и занимаясь ex officio всеми проблемами оптической науки и техники в государственном масштабе, в своих личных научных интересах он всегда был верен той основной проблеме, которой он посвятил всю свою научную жизнь и которую он определил названием своей последней монографии —«Микроструктура света».

Микрооптика — в том смысле, как ее понимал С. И. Вавилов,— это учение об элементарных процессах взаимодействия света и вещества. И если, как говорил он, классическая «макрооптика» может быть уподоблена термодинамике, то аналогом микрооптики будет молекулярная теория вещества. Микрооптика включает в себя анализ элементарных процессов поглощения и излучения света, смыкаясь здесь со спектроскопией в ее классических и квантовых аспектах, она охватывает круг явлений, специфических для предельно малых мощностей светового потока, анализируя микроскопический механизм интерференционных явлений; она, наконец, исследует неизвестные макрооптике явления, свидетельствующие о невозможности рассматривать элементарные источники света изолированно от среды, в которой они находятся. Исследование именно этих явлений, определяющихся взаимодействием квантованного электромагнитного поля световой волны и вещества, трактуемого либо как набор классических осцилляторов, либо как квантовомехани-

*) По материалам доклада А. Н. Теренина и П. П. Феофилова на заседании Президиума АН СССР, Отделения общей и прикладной физики, Отделения ядерной физики и Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР 24 марта 1966 г., посвященном 75-летию со дня рождения С. И. Вавилова.

ческая система, составило основные пути развития оптики за последние десятилетия.

15 лет, прошедшие после выхода «Микроструктуры света», ознаменовались бурными событиями в оптической науке. Возникли новые направления и области, а старые и казавшиеся исчерпанными и, во всяком случае, малоперспективными направления обрели новую жизнь. Перелистывая страницы «Микроструктуры» С. И. Вавилова, можно видеть, как многие из быстро развивающихся новых направлений в оптике были предвосхищены прозорливостью автора этих «Исследований и очерков».

Вся совокупность микрооптических процессов взаимодействия излучения и вещества с исчерпывающей полнотой и разнообразием проявляется в люминесцентных явлениях, с исследованием которых была наиболее тесно связана творческая жизнь С. И. Вавилова. Интерес к люминесценции, дающей возможность сравнительно простыми средствами проникнуть в интимный механизм процессов поглощения и испускания света, зародился у С. И. Вавилова еще в студенческие годы, когда он, работая в лаборатории П. П. Лазарева, выполнял исследование по фотохимии красителей. Сложные молекулы органических красителей, с которых начал С. И. Вавилов свои исследования по люминесценции, оказались чрезвычайно подходящим объектом для изучения элементарных оптических процессов. Именно в силу сложности этих систем оказалось возможным строить простые классические модели, столь близкие по своему духу к стилю научного мышления С. И. Вавилова, всегда предельно ясного и конкретного.

Хорошо известны громадная роль, которую сыграл С. И. Вавилов в создании и развитии в нашей стране учения о люминесценции, и влияние его работ и работ созданной им школы на развитие соответствующих направлений мировой науки. Достаточно сказать, отвлекаясь от чисто спектроскопических аспектов проблемы, что формулирование основных закономерностей, специфических для люминесценции как процесса трансформации световой энергии веществом, закономерностей, определяющих энергетику и кинетику этого процесса, связано с именем С. И. Вавилова.

Как при жизни С. И. Вавилова, так и в последующие годы, фронт работ в области люминесценции расширялся со все возрастающей скоростью. Если, как говорил С. И. Вавилов, до Октября физиков, химиков и инженеров, специализировавшихся в области люминесценции, в России можно было пересчитать по пальцам одной руки, а в 1948 г. насчитывались сотни таких специалистов, то сейчас эта армия насчитывает тысячи человек.

Люминесценция стала популярной не только потому, что она вошла в быт миллионов людей вместе с люминесцентным освещением и экранами телевизоров, но и потому, что на люминесцентных явлениях основано одно из крупнейших научных изобретений нашего времени. Идея Эйнштейна о стимуляции излучения излучением нашла свое практическое выражение в создании устройств, генерирующих излучение: мазеров и лазеров. Хотя в силу зигзагов истории науки практическая реализация оптических генераторов стимулированного излучения, лазеров, пришла через радиодиапазон, принеся с собой незнакомую и порой чуждую оптике терминологию, все предпосылки для реализации и адекватного оптического описания всей совокупности лазерных явлений имелись в учении о люминесценции и в классической волновой оптике. Совершенно очевидно, что лазеры на твердых телах не могли бы быть созданы, если бы в результате спектроскопических и люминесцентных исследований не были установлены энергетические схемы соответствующих

систем и определены вероятности переходов систем из одного электронного состояния в другое.

Создание лазеров явилось мощным стимулирующим импульсом для развития исследований по люминесценции, в особенности люминесценции активированных кристаллов. Люминесценция привлекла внимание новых сотен и тысяч специалистов и на ее языке заговорили десятки и сотни радиофизиков и представителей других, далеких от оптики специальностей.

С. И. Вавилов не дожил до создания лазеров. Однако можно очень ясно представить себе, с каким искренним энтузиазмом было бы воспринято им это открытие, как нельзя более близкое ему по духу.

О том, как близко подходил С. И. Вавилов к проблеме получения когерентного излучения от макроскопического ансамбля элементарных частиц, можно судить, прочитав в «Микроструктуре света»:

«Исключена ли возможность получения когерентного света в течение достаточно длительного времени от двух разных частиц вещества, находящихся на расстоянии, измеряемом несколькими диаметрами частиц? По-видимому, нет. Если две (или больше) такие частицы находятся одновременно в возбужденном состоянии, длящемся очень значительное время по сравнению с периодом световых колебаний, то между ними неизбежно возникнет резонансное взаимодействие или (в квантовой интерпретации) обменные силы. Вследствие этого излучение обеих частиц должно стать когерентным, связанным по фазе. Экспериментально для этого требуются очень сильное возбуждение и люминесцирующая среда, дающая молекулярное «спонтанное» свечение большой длительности (например, ураниловые соли...)».

Как похожа эта ситуация на реализуемую в современных лазерах! А было написано это за 10 лет до создания лазера.

С именем С. И. Вавилова неразрывно связано зарождение и такого нового направления, как оптика «сверхсветовых» скоростей. Эти работы С. И. Вавилова хорошо известны, поэтому о них достаточно сказать несколько слов. Анализируя совокупность обнаруженных в 1933 г. П. А. Черенковым своеобразных свойств универсального свечения чистых жидкостей под действием γ-лучей радия, С. И. Вавилов пришел к заключению, что это свечение не может быть трактовано как обычная радиолюминесценция. Решающим при этом была длительность свечения, которая, как показал С. И. Вавилов, может служить единственным однозначным критерием для отграничения люминесценции от прочих видов неравновесного излучения. Как известно, критерий длительности был введен впоследствии С. И. Вавиловым в данное им определение люминесценции. Отграничив свечение Черенкова от люминесценции, С. И. Вавилов пришел к заключению, что здесь имеет место новый вид излучения, и высказал предположение о том, что свечение вызывается не непосредственно γ-лучами, а быстрыми электронами, возникающими при рассеянии γ-лучей. Дальнейшие исследования и, прежде всего, теоретические работы И. Е. Тамма и И. М. Франка показали, что излучение Черенкова сопровождает распространение электронов в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде. Элементарная теория свечения Вавилова — Черенкова, объясняющая, прежде всего, своеобразное пространственное распределение поля излучения, может быть построена путем микрооптического анализа структуры поля интерференции световых волн, возникающих при прохождении сверхбыстрого электрона через среду. С другой стороны, как показал В. Л. Гинзбург, своеобразие

излучения Вавилова — Черенкова может быть объяснено также из представления о световых квантах и из закона сохранения импульса. Отмечая это, С. И. Вавилов подчеркивал, что здесь речь идет не о двойном объяснении, а что «оба толкования сливаются в одно соответственно двойственной корпускулярно-волновой природе света».

Еще в 20-х годах С. И. Вавиловым был поставлен вопрос о границах выполнимости принципа суперпозиции световых волн. Вытекающая из этого принципа линейность уравнений классической оптики казалась незыблемой ее основой. Несоблюдение принципа суперпозиции должно было бы приводить к нарушению независимого прохождения светового потока в пространстве, в котором распространяются другие световые пучки, и вызывать явление «саморассеяния» света. В отсутствии такого «саморассеяния», удивлявшего еще Гюйгенса, Ломоносов видел убедительный аргумент против корпускулярной теории света, согласно которой при пересечении мощных световых пучков должно было бы происходить «в лучах замешательство». Оппоненты Ломоносова — защитники корпускулярной концепции — искали выход в предположении о чрезвычайной малости световых корпускул.

Открытие квантового характера световых явлений вынудило заново поставить вопрос о принципе суперпозиции и о линейности уравнений оптики. Хотя попытки обнаружения саморассеяния света неизменно давали отрицательные результаты, границы эмпирической точности принципа суперпозиции оставались достаточно неопределенными. Убедившись путем собственных экспериментов в тщетности попыток установить эти границы в условиях земных опытов с наиболее интенсивными из существовавших в то время источников, С. И. Вавилов произвел их оценку по яркости солнечной короны, наблюдаемой в пространстве, где пересекаются световые пучки огромной интенсивности. Оценки дали в качестве верхней границы эффективного поперечного сечения квантов чрезвычайно малую величину (10^{-40} *см*^{2}), которая при позднейших теоретических рассмотрениях оказалась еще на много порядков меньшей. Сейчас мы знаем, что эти сечения столь малы, что даже современные экспериментальные возможности не позволяют обнаружить саморассеяние света в пространстве, лишенном вещества.

Иначе обстоит дело при распространении света в веществе, где может наблюдаться существенное нарушение линейности.

Еще в период становления теории квантов, в 1920 г. С. И. Вавилов опубликовал результаты опытов по проверке независимости коэффициента поглощения вещества от интенсивности проходящего через вещество света. Эти опыты были проведены в рекордно широких пределах — интенсивность света менялась в 10^{20} раз. В те времена наиболее интересной представлялась область предельно малых интенсивностей, где, согласно гипотезе создателя теории квантов М. Планка о непрерывном характере поглощения и квантовом характере испускания, можно было ожидать сильного возрастания поглощения. Установленное в опытах С. И. Вавилова постоянство коэффициента поглощения в широком интервале интенсивностей опровергало «гибридную» гипотезу Планка и свидетельствовало о том, что поглощение также имеет квантовый характер.

Позднее С. И. Вавилов вновь обратился к вопросу о линейности поглощения, но уже в другом предельном случае — при очень больших интенсивностях проходящего света. В 1925 г. в опытах с очень высокой интенсивностью света (конденсированная искра), проведенных совместно с В. Л. Левшиным, удалось наблюдать уменьшение коэффициента поглощения уранового стекла на 1,5% при средней погрешности ±0,3%. Явление было истолковано как следствие сравнительно большой дли-

тельности люминесценции уранового стекла ($\sim 10^{-4}$ *сек*) и связанной с этим возможности накопления в возбужденном состоянии заметной доли активных центров. У так называемых фосфо́ров, имеющих длительности возбужденных состояний порядка секунд и более, значительные нарушения линейности могут без труда наблюдаться уже при сравнительно небольших интенсивностях, причем в ряде случаев эти нарушения настолько велики, что могут быть положены в основу особых «абсолютных» фотометров. Построенный в свое время по идее С. И. Вавилова такой «нелинейный» фотометр может рассматриваться как первая реализация нового оригинального принципа фотометрии.

Нарушение линейности уравнений оптики при взаимодействии излучения с веществом 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. Как писал в 1944 г. С. И. Вавилов, частные «задачи такого рода решаются не строгим аналитическим путем, а при помощи очень грубых и примитивных упрощений. Иногда, и даже часто, этого достаточно, но все же давно нужно бы уметь решать эти задачи lege artis. Не следует забывать, что реальная оптика вещества, с которым мы имеем дело, в общих случаях нелинейна и ее трактовка требует «нелинейного» математического аппарата».

Таким образом, еще за 15 лет до реализации первых лазеров, когда стала возможной широкая постановка экспериментальных исследований в области нелинейной оптики, С. И. Вавилов совершенно четко формулировал необходимость создания теоретических предпосылок таких исследований, имея в виду прежде всего задачи астрофизики. Предвидеть, что теория нелинейных оптических явлений потребуется в столь недалеком будущем для земных экспериментов, было невозможно.

Как известно, за последние годы нелинейная оптика развивалась чрезвычайно интенсивно как в экспериментальном, так и в теоретическом аспектах, причем это развитие шло под сильным влиянием идей и методов нелинейной теории колебаний, сложившейся в радиофизике несколько ранее. Большой вклад в развитие нелинейной оптики внесли наши соотечественники Р. В. Хохлов и С. А. Ахманов. В настоящее время, помимо тех простейших нелинейных явлений в люминесцирующих системах, о которых мог говорить С. И. Вавилов, обнаружено и предсказано очень большое число явлений, часть из которых имеет первостепенное познавательное и прикладное значение. Это, прежде всего, генерация второй и высших гармоник, суммарных и разностных частот при взаимодействии волн в кристаллах, оптическое детектирование — изменение постоянной поляризации диэлектрика в поле мощной световой волны, вынужденное комбинационное и мандельштам-бриллюэновское рассеяние, суммирование энергии электронного возбуждения активированных кристаллов и т. д. Учет нелинейных явлений совершенно необходим при анализе работы твердотельных лазеров, при изучении люминесцентных явлений в сильно возбужденных люминофорах и т. п. О размахе исследований по нелинейной оптике можно судить хотя бы по тому, что ее проблемы рассматриваются на специальных симпозиумах, собирающих сотни участников. Так на наших глазах в оптике возникло и быстро развивается новое, в высшей степени перспективное направление, у истоков которого стоял С. И. Вавилов.

Иногда отклонения от линейности могут быть очень сильными. Так, в последнее время нам удалось наблюдать случаи, когда интенсивность видимой люминесценции, возбуждаемой в результате суммирования

в активированных кристаллах нескольких инфракрасных квантов, оказывалась пропорциональной третьей степени интенсивности возбуждающего света.

Последние годы научной деятельности С. И. Вавилова были ознаменованы все возрастающим интересом его к проблеме взаимодействия элементарных источников света и среды. При обычном макрооптическом рассмотрении предполагается, что для решения задач о распространении света в среде достаточно охарактеризовать источник света в отношении его спектра, интенсивности и состояния поляризации и задать постоянные, характеризующие среду — ее показатели поглощения и преломления и величину оптической активности. Однако такое описание, игнорирующее взаимосвязь источника и среды, и пригодное для рассмотрения процессов, протекающих в «волновой зоне» при расстояниях от источника, превышающих длину волны испускаемого света, в ряде случаев оказывается недостаточным. Так, 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, 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 удаленных 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.

Первым следствием установления индуктивной связи в люминесцирующих системах должно быть изменение излучательной способности люминесцирующих молекул и поглощательной способности невозбужденных, расположенных вблизи от излучающих. К сожалению, экспериментальное исследование этих явлений, предпринятое С. И. Вавиловым в самые последние годы его жизни, и составившее тему одной из последних его научных публикаций, не получило дальнейшего развития.

Наличие индуктивной резонансной связи между молекулами в растворах приводит также к тому, что при достаточном сближении молекул, т. е. при достаточной концентрации растворенного вещества, энергия электронного возбуждения за счет поглощенного кванта света получает возможность передаваться от возбужденных молекул к невозбужденным. Это объясняет ряд своеобразных явлений, наблюдаемых при возрастании концентрации люминесцирующего вещества в растворах.

Развив теорию таких 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 наличие общих частот у молекул — необходимого условия для возможности резонансного взаимодействия.

Как показали многочисленные исследования последних лет, введение понятия о миграции энергии электронного возбуждения в люминесцирующих средах (как аморфных, так и кристаллических) чрезвычайно расширяет представления о возможных в них процессах. Блуждая

по такой системе, которая, вообще говоря, может быть многокомпонентной и содержать набор центров, являющихся как донорами, так и акцепторами энергии, энергия возбуждения может реализоваться в той или иной форме в зависимости от параметров, управляющих миграцией, и от относительной вероятности различных путей реализации мигрирующей энергии: спонтанного высвечивания донора или акцептора, безызлучательной конверсии в основное или нижайшие возбужденные состояния, фотохимических процессов и т. д. За последние годы наши знания об этих процессах существенно расширились: к простейшим явлениям, известным С. И. Вавилову,— тушению и сенсибилизированной люминесценции — добавились такие, например, как обнаруженное и исследованное Н. А. Толстым и его сотрудниками явление «нелинейного» тушения, связанного с взаимодействием двух возбужденных центров. В наших последних работах было обнаружено явление суммирования — кумуляции энергии электронного возбуждения в активированных редкими землями ионных кристаллах, также связанное с миграцией энергии, и приводящее, в частности, к конверсии инфракрасного излучения в видимое при резкой нелинейности связи излучаемого и возбуждающего света (вплоть до 3-й степени), о которой упоминалось выше. Крайне близки к идеям, развивавшимся С. И. Вавиловым, обнаруженные несколько лет назад в США явления, когда две элементарные взаимодействующие системы приводились в два различных возбужденных состояния с помощью одного поглощенного кванта. Все эти и многие другие родственные явления свидетельствуют о зарождении в оптике еще одного нового направления — оптики взаимодействующих элементарных систем. Строго говоря, это уже не оптика или, вернее, не только оптика, но и молекулярная физика и физическая химия, иными словами, это тот «стык» наук, на котором, как известно, с большой вероятностью рождаются открытия.

Мы смогли коснуться только нескольких основных направлений современной оптики, стремясь показать, что своими корнями они в большей или меньшей степени связаны с кругом главных научных интересов С. И. Вавилова. В некоторых случаях эти направления есть прямой результат развития его идей, в других они развивались под сильнейшим влиянием этих идей. Устанавливая генетическую связь этих направлений с работами С. И. Вавилова, мы не должны забывать, что в его научном наследии есть много еще недостаточно оцененных высказываний и замечаний. Научные и популярные труды С. И. Вавилова, его блестящие выступления и речи, по праву входящие в золотой фонд отечественной и мировой культуры, несомненно, окажутся и в дальнейшем источником плодотворных идей.