

Ирина Радунская Крушение парадоксов

Эврика –



«Крушение парадоксов»: «Молодая гвардия»; 1971

Аннотация

Мазеры и лазеры сделали не только орудием техники, но и скальпелем науки. Они помогли обнаружить столько неожиданных явлений, что ученым впору ринуться на штурм самых глубинных свойств материи.

В книге рассказывается о работах академиков Николая Геннадиевича Басова и Александра Михайловича Прохорова в этой области.

Ирина Радунская Крушение парадоксов

От автора

Слова «мазер» и «лазер» знакомы нам уже десять лет. О них теперь знают не только ученые. Не только журналисты. Но даже школьники.

Всем знакомы и имена Николая Геннадиевича Басова и Александра Михайловича Прохорова — первых ученых, услышавших радиопередачу из мира атомов и молекул. Они заслуженно увенчаны славой, званиями, почестями. Они лауреаты Ленинской премии, Нобелевской. Академики. Герои Социалистического Труда. Руководители не только своих лабораторий, но и прославленного в мировой науке Физического института имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР.

После выхода в свет моих первых книг о драматической истории создания мазеров и лазеров — «Безумные» идеи» и «Превращения гиперболоида инженера Гарина» — я с сожалением думала о том, что теперь надо переходить к другой теме, ведь пришел конец одной из самых волнующих страниц истории науки.

Я считала, что Басову и Прохорову в квантовой радиофизике уже нечего делать. Как наука она явно завершена. Их же трудами она из охапки парадоксов, курьезов, загадок превратилась в рычаг техники и промышленности. И ничего таинственного в ней не осталось...

Меня беспокоила судьба моих героев, и вот спустя несколько лет я снова в знакомых мне лабораториях! Что же я увидела?

Молодые ребята, пришедшие к Басову и Прохорову прямо со школьной скамьи, которых несколько лет назад можно было безбоязненно называть Коля, Наташа, Витя, стали кандидатами, докторами наук. Сами Басов и Прохоров уже не хлопочут в маленькой комнате вокруг одного прибора — за их плечами огромные самостоятельные коллективы.

А мазеры и лазеры сделались не только орудием техники, но и скальпелем науки. И они помогли обнаружить столько неожиданных явлений, что ученым впору собрать все свои знания и силы, чтобы ринуться на штурм самых глубинных свойств материи, о которых до появления мазеров и лазеров они и не подозревали.

Оказалось, самое интересное только начинается...

Глава I. Начала

Старт

Кто знает, вращающаяся ли палочка, трущаяся о сухую чурку, или огниво, кресало и трут были первыми средствами получения огня, освободившими наших пращуров от необходимости постоянно поддерживать огонь, подаренный им природой. Для нас важнее то, что люди научились заимствовать огонь от Солнца. Они применили для этой цели стеклянные сосуды, наполненные водой, или отшлифованные в виде зерна чечевицы прозрачные кристаллы кварца. Они пленили свет. Смена дня и ночи, жар Солнца и блеск Луны, сполохи молний и свет костра! Человек не мог не думать о свете.

Эвклид, создатель геометрии, написал и первый труд, посвященный свету. В его «Оптике» сформулирован закон, определяющий поведение световых лучей, закон отражения света от зеркал: угол падения равен углу отражения.

Люди пользуются этим законом более двух тысяч лет. Еще раньше стало ясным, что свет распространяется по прямой. У Эвклида луч света служит символом прямой линии. Понадобилось столетие, чтобы убедиться в том, что «закон природы», сформулированный человеком, может быть нарушен.

Земляк Эвклида — Птолемей учитывал искривление лучей света в атмосфере при своих замечательных астрономических наблюдениях. Но, несмотря на высокую точность измерений, и Птолемей ошибся. Он счел, что угол преломления пропорционален углу падения. Что, впрочем, не сильно отличалось от истины при тех небольших углах, с которыми имел дело Птолемей.

В течение более чем пятнадцати веков те, кого называли учеными, считали, что в оптике все кристально ясно. Ремесленники все лучше и лучше шлифовали линзы для людей, страдавших плохим зрением. Венецианские и голландские мастера комбинировали свои линзы в зрительные трубки, чудесным образом приближавшие отдаленные предметы и обнаруживавшие удивительные детали при рассмотрении близких предметов.

Даже великий Галилей, усовершенствовавший голландскую трубку и направивший свой телескоп на Солнце, Луну и планеты, по-видимому, особенно не задумывался над тем, как эта трубка действует.

Лишь через тридцать лет после того, как Галилей сообщил потрясенным современникам о том, что и на Солнце бывают пятна, а планета Юпитер имеет четыре луны, появилось сочинение под названием «Диоптика». Его автором был французский философ,

физик и математик Декарт. Он стремился привести все доступные ему знания в соответствие с общей картиной мироздания, созданной им в результате критического анализа работ предшественников и строгих логических построений.

Мало кто всерьез отнесся к трудам легкомысленного офицера. Репутация автора не располагала к доверию. Декарт после окончания колледжа вел бурную жизнь офицера, участвуя в Тридцатилетней войне, отдавая должное светской жизни. Мало кто знал, что он выкраивал время для занятий философией и математикой.

В тридцать лет он почувствовал непреодолимую тягу к науке. Ему исполнилось тридцать два, когда им были закончены «Правила для руководства ума», изданные лишь посмертно. Деятельность, враждебная схоластике и церковному догматизму, заставила Декарта покинуть родину и поселиться в Голландии, где он прожил двадцать наиболее плодотворных лет, до 1649 года, когда преследования церковников вынудили его переехать в Швецию. Здесь он вскоре умер.

Причины

В «Диоптике» Декарт систематизировал сведения об оптических явлениях, пришедшие почти неизменными из глубокой древности. Все они были чисто описательными. Он же стремился вскрыть причины явлений и отыскать в них внутренние закономерности. Декарт полностью отрицал возможность действия на расстоянии. Он был убежден, что всякое действие передается через давление и толчки. Никаких других сил в то время никто не знал. Все процессы, с его точки зрения, сводятся к пространственному перемещению тел.

Каждый человек ощущал в жаркий день нестерпимое давление солнечных лучей. Не удивительно, что Декарт считал, что свет — не что иное, как передача давления от источника через особую тонкую среду, заполняющую все пространство. Древние ученые приготовили слово, подходящее в качестве названия для этой среды, — «эфир». Так эфир вошел в науку. Декарт описал механические свойства среды, способной, по его мнению, передавать давление с бесконечной скоростью на любые расстояния.

Декарт включил в «Диоптику» наряду с законом отражения света, пришедшим от Эвклида, и закон преломления света, открытый им самим за семь лет до выхода его книги. В то время не было принято спешить с опубликованием открытий, даже таких, которые опровергают закон великого Птолемея, считавшийся неоспоримым свыше полутора тысяч лет. Впрочем, впоследствии оказалось, что голландец Снеллиус установил тот же закон опытным путем за девять лет до Декарта и вовсе не считал нужным его опубликовать.

— Ну и порядки, — сказал один из моих знакомых физиков, прочитав это место рукописи, — теперь я вижу пользу изучения истории науки. А ведь мы негодуем, когда редакция журнала задерживает наши заметки на лишний месяц! — Подумав немного, он добавил: — Не понимаю, почему в учебниках этот закон все же называется законом Снеллиуса. Ученый работает не для себя, глупо держать полученные результаты под спудом. Они принадлежат людям. Их необходимо публиковать!

Да, не те времена, не те и песни. Другой темп, иное отношение к науке и ее творцам. В то время наука лишь медленно набирала темп после мертвящего застоя средневековья. Прошло еще около тридцати лет до следующего шага, когда Гук в своей «Микрографии» объяснил свет быстрыми и очень малыми колебаниями, проходящими через эфир на наибольшее вообразимое расстояние за наименьшее вообразимое время. Гук уже знает, как объяснить происхождение радужных цветов, когда белый свет проходит через призму. Он заново выводит закон преломления Декарта — Снеллиуса и говорит, что угол преломления зависит от цвета.

Впрочем, он должен был и это знать из книги Декарта «Метеоры», в которой дано объяснение механизма возникновения радуги: первая радуга появляется в результате двукратного преломления и одного отражения света в капле, а вторая радуга есть результат

двух преломлений и двух отражений. Декарт даже подтвердил свою теорию опытом по преломлению света в стеклянных шарах.

Однако не в характере Гука было ссылаться на чужие результаты.

Лишь через четверть века после «Микрографии» вышел из печати «Трактат о свете» Гюйгенса. Труд вылеживался в виде рукописи целых двенадцать лет. Однако открытия, сделанные Гюйгенсом, были столь важными, что быстро стали известными. В то время ученые охотно переписывались между собой.

Гюйгенс ввел в науку световые волны как упругие возмущения, распространяющиеся во множестве чрезвычайно малых и весьма жестких сферических частиц эфира, проникающих сквозь все тела. Он также выдвинул общий принцип, позволяющий путем геометрических построений определить направление распространения любого волнового процесса.

Гюйгенс был, пожалуй, первым выдающимся представителем нового типа ученых. Он достиг незаурядных успехов в фундаментальных исследованиях в области математики и физики, но не менее ценными были его технические изобретения и конструкции. Разносторонность его необычайна. В молодости он отдавал предпочтение математике и астрономии. Открыл спутник Сатурна и его кольца. Основываясь на работах Галилея, изобрел маятниковые часы, а затем, участвуя в конкурсе, объявленном Британским адмиралтейством, изобрел вращающийся маятник-балансир и на его основе создал часы, не боявшиеся корабельной качки. Интересно, что Гюйгенс был избран иностранным членом Лондонского королевского общества в том же 1663 году, когда членом этого общества избрали и Гука, совместно с которым он установил важнейшие постоянные точки термометра — точку таяния льда и точку кипения воды.

Обыкновенные и необыкновенные лучи

В 1678 году Гюйгенс прочитал членам Парижской академии наук свой «Трактат о свете». В нем объяснены причины того, что происходит со светом при отражении и преломлении, в частности, при странном преломлении исландским шпатом. Продолжая традиции Декарта, требовавшего критического отношения к любому знанию, Гюйгенс в начале своего трактата вскрывает важную ошибку Декарта. Гюйгенс прямым расчетом показывает, что вывод о бесконечной скорости света, полученный Декартом на основании наблюдения затмений Луны, неубедителен из-за недостаточной точности наблюдений. «Они позволяют лишь утверждать, — пишет Гюйгенс, — что скорость света в сто тысяч раз больше скорости звука». Далее Гюйгенс использует изумительные наблюдения движения спутников Юпитера, сделанные за два года до того Ремером с целью определения скорости света. Проведя нужные вычисления и получив огромную величину, Гюйгенс восклицает: «И все же это нечто совсем отличное от мгновенного распространения, так как разница здесь такая же, как между конечной вещью и бесконечной».

В своих представлениях о природе света Гюйгенс во многом близок к Гуку: свет — это упругие импульсы в эфире, считает он, но нигде не пользуется понятием длины волны и не предполагает, что волны света имеют определенный период.

Несмотря на свою геометричность, метод Гюйгенса, основанный на построении сферических волновых фронтов, позволил ему, следуя традиции Декарта, вывести законы отражения и преломления света, которые до того принимались просто как опытные факты и не имели объяснения.

Мощь и эффективность своего принципа распространения света Гюйгенс продемонстрировал, объяснив таинственное расщепление луча света на два отдельных луча в кристаллах исландского шпата.

Гюйгенс назвал один из этих лучей «обыкновенным», ибо он подчинялся закону преломления Декарта, а другой — «необыкновенным», так как он нарушает этот закон и

преломляется «неправильно».

«Двойное лучепреломление» открыто Братолином в 1669 году и казалось современникам не только необъяснимым, но и противоречащим всему, что написано о свете, в том числе Декартом и Гуком.

Возможность объяснить двойное лучепреломление была чрезвычайно важна для Гюйгенса, ибо его принцип приводил к противоречию с Гуком в важнейшем пункте, а именно в объяснении закона преломления света. И тот и другой выводили закон преломления из различия скоростей света по обе стороны границы двух сред. Например, границы воздуха и стекла. При этом показатель преломления, по Гюйгенсу, выражается отношением скорости света в первой среде к его скорости во второй. У Гука же получалось обратное отношение. А экспериментальные возможности были таковы, что об измерении скорости света в лабораторных условиях не могло быть и речи.

Впрочем, можно понять, почему Гюйгенс не пошел до конца в разработке волновой теории света. Он исходил из аналогии многих оптических явлений с акустическими. А акустика имеет дело со звуковыми волнами. Но при распространении звука частицы воздуха колеблются вдоль направления, по которому бежит волна. Если свет действительно такая же продольная волна в эфире, то совершенно невозможно объяснить явление поляризации света, открытое самим Гюйгенсом при исследовании двойного лучепреломления. Ведь оба луча, на которые распадался луч света, падающий на кристалл исландского шпата, совершенно различны и преломляются по-разному. Ничего подобного в акустике нет и быть не может.

Звуковые волны не способны распространяться подобно свету. Солнечный свет, в этом может убедиться каждый, проходит через отверстие в ставне в виде узкого, четко ограниченного луча. А звук, проходя даже через узкий канал в каменной стене, заполняет всю комнату.

Нет, Гюйгенс, которого принято считать создателем волновой теории света, сделал только первый шаг. Он даже не попытался объяснить открытое Гримальди явление дифракции — огибание светом препятствий, хотя книга Гримальди «Физико-математический трактат о свете, цветах и радуге» появилась задолго до трактата Гюйгенса.

Волновые идеи уже тогда носились в воздухе, и Гримальди, обнаруживший огибание света вокруг препятствий, не мог обойтись без представления о волнах. Но в его понимании свет не был собственно волнами, он представлял себе свет жидкостью,двигающейся быстро через пространство и прозрачные тела. Воображение рисовало Гримальди, как волны появляются в световой жидкости при ударе ее о края препятствия, что заставляет световую жидкость затекать за препятствия совсем так, как вода в ручье обтекает камни. Гримальди на правах первооткрывателя назвал это явление дифракцией. Оно навсегда осталось в науке, выйдя далеко за пределы оптики и наполнившись совершенно новым содержанием.

Впрочем, не только название, придуманное Гримальди, дожило до наших дней. Гримальди первым составил карту Луны и дал дошедшие до нас имена многим деталям ее видимой поверхности.

Титан

Случаю было угодно, чтобы в том же 1665 году, когда вышли в свет и посмертное издание трактата о свете Гримальди, и «Микрография» Гука, окончил Тринитиколледж в Кембридже и получил степень бакалавра фермерский сын, сирота Исаак Ньютон. Уже в студенческие годы замкнутый юноша начал разрабатывать идеи, вознесшие его выше всех естествоиспытателей мира. Он много спорил с Гуком, который иногда стремился доказать, что кое в чем опередил Ньютона. Впрочем, и другие ученые имели основания обвинять Гука в стремлении присвоить чужие достижения. Дискуссии с Гуком привели, в частности, к тому, что Ньютон не публиковал своих работ в области оптики до смерти Гука.

Ньютон считал свет потоком частиц-корпускул. И, тем не менее он лучше всех современников понимал всю важность периодических свойств света. Ведь, наблюдая цветные кольца, которые каждый может увидеть, положив слабовыпуклую стеклянную линзу на плоскую пластинку и измеряя их размеры, Ньютон мог вычислить длины волн, соответствующие различным цветам. Однако Ньютон понимал, что, уподобив волны света волнам звука, нельзя не только объяснить двойного лучепреломления, но и невозможно описать прямолинейное распространение световых лучей. Все это заставило Ньютона прийти к выводу о телесности света и считать свет потоком корпускул.

Но глубокое изучение явления дифракции света и его поляризации при двойном лучепреломлении привело Ньютона к выводу о недостаточности простой корпускулярной теории. И он сделал великий шаг, попытавшись объединить волновые и корпускулярные свойства света в единое явление.

В синтетической теории свет по-прежнему выступал потоком частиц, вылетающих из источника света, но предполагалось, что движение частиц через эфир возбуждает в нем волны. Волны опережают порождающие их частицы и, набегая на препятствия, заставляют частицы искривлять свой путь, огибая препятствия. Частицы, летящие далеко от края препятствия, движутся прямолинейно, не испытывая никакого воздействия.

Такая теория могла объяснить все оптические явления, известные Ньютону. Но он вынужден был отказаться от нее, ибо существование эфира не согласовывалось с наличием солнечной системы. Ньютон не мог понять, почему эфир не препятствует движению планет!

Сегодня, с вершины XX века, нам легко сказать, что проникновение в сущность света — задача, непосильная одному человеку, сколь бы велик он ни был. Однако величие Ньютона проявилось не только в его достижениях, но и в его ошибках. Например, изучив процесс разложения белого света на составляющие его цвета и получив белый свет сведением воедино радужной полосы, Ньютон связал эти явления с одним из типов искажений изображения в линзах. Это искажение — возникновение радужных каемок на краях изображения — казалось ему неустранимым. И... Ньютон создает зеркальный телескоп, свободный от этого недостатка. Зеркальные телескопы и поныне являются наиболее мощными астрономическими приборами.

Исследования хроматической аберрации и история зеркального телескопа позволяют добавить несколько черточек к характеристике личности Ньютона. Бельгийский физик Лукас приобрел известность тем, что, повторив опыты Ньютона по преломлению света в призме, обнаружил численное расхождение своих результатов с ньютоновскими. Ньютон утверждал, что Лукас ошибся, не дав себе труда повторить опыт. Теперь мы знаем, что они пользовались призмами из различных сортов стекла. И нам трудно понять, почему это осталось незамеченным.

Зеркальный телескоп создан Ньютоном целиком на основе собственных исследований и расчетов. Однако не значит, что он был первым. В то время уже существовали достаточно крупные телескопы, совершенно не имевшие линз. А упоминание о зеркальных телескопах встречается еще в трудах Галилея.

Величие Ньютона проявилось и в том, что, сознавая трудность корпускулярной теории, не способной объяснить периодические свойства света, и не имея возможности принять существование эфира, он не занял здесь какой-либо определенной позиции, не пресек, не ограничил авторитетом своего имени дальнейшие исследования.

Но всегда находятся католики, желающие быть святее папы. После смерти Ньютона постепенно забылось, что в последнем издании его «Оптики» он приводит семь аргументов в пользу волновой теории и лишь один против нее. Последователи возвели в абсолют его корпускулярную теорию, и она заняла господствующее положение вплоть до начала XIX века, тормозя развитие науки.

Перелом произошел, когда Юнг возродил волновую теорию для объяснения интерференции, а Френель решил наконец с ее помощью и проблему дифракции.

Томас Юнг начал заниматься физикой и математикой в восьмилетнем возрасте, когда большинство детей лишь начинает знакомиться с азбукой и арифметикой. Через год он приступил к изучению иностранных языков, а также латинского, греческого, древнееврейского и арабского. В это время его главным увлечением стала ботаника. Казалось, мальчика ожидает судьба большинства вундеркиндов — популярность в детстве и быстрое забвение. Но Юнг избежал столь печальной участи. В двадцать лет он опубликовал «Наблюдения над процессом зрения». Здесь на основе своих опытов он поставил под сомнение корпускулярную теорию света, уже, безусловно, отождествлявшуюся с именем Ньютона, и высказался за волновую теорию.

Его дерзость вызвала бурю. Под давлением критики правоверных ньютонианцев Юнг признал необоснованность своих взглядов и на время прекратил занятия оптикой. Он усиленно трудился, готовясь к получению диплома доктора медицины.

Однако мысли о природе света не были оставлены. Опубликованный Юнгом в 1800 году трактат «Опыты и проблемы по звуку и свету» позволяет отчасти заглянуть не только в его физический кабинет, но и в ту чисто психологическую сферу, которую теперь принято называть творческой лабораторией ученого. Юнг упоминает о том месте из третьей книги знаменитого труда Ньютона — «Математические начала натуральной философии», где говорится о работах астронома Галлея, наблюдавшего аномально высокие приливы, возникающие в некоторых местах Филиппинского архипелага. Ньютон объясняет их взаимным наложением приливных волн.

Хорошему артисту достаточно одного слова суфлера, чтобы свободно провести сложный монолог, конечно, если артист достаточно подготовлен к роли предыдущей самостоятельной работой.

Юнг был готов! Частный пример, относящийся к столь далекой от оптики теории приливов, был толчком, породившим лавину.

«Представьте себе ряд одинаковых волн, бегущих по поверхности озера... Представьте себе далее, что по какой-либо аналогичной причине возбуждена другая серия волн той же величины, проходящих... с той же скоростью одновременно с первой системой волн. Ни одна из этих двух систем не нарушит другой, но их действия сложатся, если... вершины одной системы волн совпадут с вершинами другой системы; если же вершины одной системы волн будут расположены в местах провалов другой системы, то они в точности заполнят эти провалы и поверхность воды останется ровной. Так вот, я полагаю, что подобные явления имеют место, когда смешиваются две порции света; и это наложение я называю общим законом интерференции света».

Чисто умозрительное заключение Юнг подтверждает простым и наглядным опытом. Замечательный опыт Юнга может повторить каждый. В куске картона нужно проколоть булавкой два небольших отверстия и осветить их солнечным светом, проходящим через отверстие в закрытом ставне. На противоположной стене или на специальном белом экране возникнет чередование светлых и темных полос: светлые полосы там, где световые волны, проходящие через оба отверстия, накладываются согласованно (в фазе), а темные — там, где они гасят друг друга (накладываются в противофазе).

Если закрыть одно из отверстий, то полосы исчезают. Остаются лишь дифракционные кольца, которые наблюдал еще Гримальди. Исчезают полосы и при открывании ставня, когда узкий пучок света, падающий на оба отверстия, заменяется широким. Так проводил свои опыты Гримальди и, конечно, не мог обнаружить полос.

Работу Юнга восприняли с недоверием, а его соотечественники — англичане насмеялись над дилетантом, покусившимся на великое наследие Ньютона. Но теперь Юнг

не сдавался.

Луч из волн

Одновременно с Юнгом, ничего не зная о его работах, оптическими исследованиями занимался еще один дилетант, французский дорожный инженер Огюстен Френель. Он участвовал в борьбе против Наполеона, и во время чисток, проходивших в период «Ста дней» после возвращения Наполеона с Эльбы, Френель уехал в деревню. Здесь он начал систематические исследования в области оптики, Средства его были ограничены, столь же бедными были и его экспериментальные возможности. Но мощь интеллекта и привычка обходиться простыми математическими методами позволяли ему извлекать из примитивных опытов поразительные результаты. А инженерная хватка и требовательность к надежности каждого результата делали его опыты безупречными.

Френель начал с изучения теней от малых предметов. В наиболее чистом виде это можно сделать при помощи тонких проволок. И Френель обнаружил систему чередующихся полос, заменяющих резкую границу тени, которую следовало ожидать, исходя из корпускулярной теории. Стоило поднести к проволоке с одной ее стороны край непрозрачного экрана, как светлые полосы внутри тени исчезали. Оставались лишь темные полосы в освещенной части, которые наблюдал еще Гримальди.

Френель объяснил возникновение светлых полос внутри области тени наложением двух частей световой волны, огибающих проволоку с обеих сторон. Так он самостоятельно пришел к пониманию интерференции света.

Впоследствии, узнав о работах Юнга и его опытах с двумя отверстиями и желая полностью отделить явление интерференции от явления дифракции на краях отверстия, Френель придумал опыт с двумя зеркалами и сдвоенной призмой. Это позволило ему расщеплять и вновь сводить вместе световые волны, проходящие через узкую щель, и наблюдать прекрасные интерференционные картины, знакомые теперь любому школьнику.

Френель объединил принцип интерференции с методом элементарных волн и огибающей волны, введенным Гюйгенсом. Получилась законченная система. Притом элементарные волны и их огибающая уже не были чисто геометрическим понятием и способом построения, как у Гюйгенса, но стали самой сущностью световой волны. Френель не ограничился этим, он дал математическую формулировку волновой теории света.

Он показал, что отдельные участки волнового фронта, исходящего из светящейся точки, порождают вторичные волны таким образом, что они полностью гасят друг друга — все, за исключением небольшой центральной части, расположенной на прямой, соединяющей источник света с освещаемой точкой.

Так был разрешен вековой парадокс, стоявший на пути волновой теории света. Найдено объяснение прямолинейных световых лучей, возникающих и остающихся узкими, несмотря на волновую природу света. Вот оно: все волны, отклоняющиеся от прямой, полностью гасят друг друга. Все они гасятся, не препятствуя распространению узкого луча, состоящего из центральных участков волн, бегущих прямолинейно.

Френель сумел математически рассчитать все детали процесса, приводящего к огибанию световых волн вокруг краев предметов, указав, в частности, как этот процесс зависит от длины волны. Так была наконец построена теория дифракции.

Великие математики — Лаплас и Пуассон, а также некоторые физики считали инженера Френеля дилетантом и в математике. Первые статьи Френеля о дифракции подверглись их критике за отсутствие математической строгости.

Парадокс

Через несколько лет Френель заново формулирует свои результаты и представляет их на конкурс Парижской академии наук. Работу рассматривает специальная комиссия — Лаплас, Пуассон, Араго, Био, Гей-Люссак. Трое первых — убежденные ньютонианцы, сторонники корпускулярной теории света. Араго склонялся к волновой теории света, но, как экспериментатор, не мог противостоять безупречной математической логике Лапласа и Пуассона. Гей-Люссак занимался исследованием свойств газов, химией и изучением множества частных вопросов, ни один из которых не имел отношения к оптике. Академики понимали, что Гей-Люссак не может являться авторитетом по существу работы Френеля, но, по-видимому, ввели его в комиссию в расчете на его беспристрастие и безупречную честность. Впрочем, научная добросовестность всех членов комиссии была выше всяких подозрений.

Пуассон столь глубоко изучил мемуар Френеля (в то время термин «мемуар» имел значение современного термина «монография»), что сумел обнаружить удивительный вывод, следующий из расчетов Френеля. Из расчетов следовало, что в центре тени непрозрачного диска надлежащих размеров должно быть светлое пятно. Пятна должны исчезать и появляться вновь по мере отодвигания от диска экрана, на котором наблюдается это явление.

Более того, на оси, соединяющей точечный источник света с небольшим отверстием, тоже должны наблюдаться чередования света и тени. Согласовать такой парадокс с представлением о корпускулах, летящих вдоль луча света, было невозможно.

Комиссия согласилась с мнением Пуассона о том, что это противоречит здравому смыслу, и предложила Френелю подтвердить свою теорию опытом. Комиссия считала, что такой опыт решит давний спор между волновой и корпускулярной теориями.

Араго помог Френелю выполнить решающий эксперимент. «Здравый смысл» был посрамлен, Френель получил премию, волновая теория света, казалось, восторжествовала навсегда. Однако в это время из пучин научного океана выглянула скала, грозившая потопить прекрасный корабль волновой теории Френеля.

Тупик

Мало известный теперь физик Малюс обнаружил, что свет поляризуется не только при прохождении через исландский шпат, но и при простом отражении или преломлении на границе двух сред. Открытие Малюса легко объяснялось свойствами корпускул света, которым Ньютон приписывал асимметрию или полярность. По его выражению, каждый луч света имеет две стороны. Поэтому явления поляризации света считались в то время сильнейшим аргументом в пользу корпускулярной теории.

Блестящая интуиция Френеля заставила его пренебречь авторитетом Ньютона. Он пошел по пути Гюйгенса, от которого он заимствовал аналогию световых волн с акустическими. Он понимал, что волновая теория не способна объяснить опыты Малюса и все известное людям до и после него о поляризации света, если не считать волны света поперечными, подобными тем, что каждый видел на поверхности воды. Такое предположение выдвигали еще Гримальди и Гук, но в остальном их представления о световых волнах были наивными и туманными. Но во времена Френеля о поперечности световых волн уже не думал никто. Не помышлял о поперечности световых волн и Френель. Из его ранних статей, докладов и писем неясно, пытался ли он, оставаясь в рамках гипотезы продольных волн, справиться с проблемой поляризации или просто пренебрег этой трудностью во имя объяснения всех остальных известных ему свойств света. Ясно одно. Френель убежден в несостоятельности корпускулярной теории. Ньютоновское объяснение поляризации казалось ему столь неубедительным, что он считал его несуществующим. А если так, то единственный грех волновой теории он не считал смертным грехом.

Известно, что Био и Араго тоже провели ряд замечательных исследований в области поляризации света. Работы Био чрезвычайно укрепили его уверенность в справедливости

корпускулярной природы света. Араго открыл поляризацию рассеянного света неба и обнаружил хроматическую поляризацию, но, считая важным лишь обнаружение новых фактов, в надежде на то, что со временем они улягутся в рамки будущей теории, он предпочитал не задумываться над трудностями, казавшимися ему непреодолимыми. Араго вместе с Френелем систематически изучал интерференцию поляризованных лучей. В ходе работ они совместно установили, что два луча света, поляризованные в параллельных плоскостях, способны интерферировать между собой, в то время как лучи, поляризованные перпендикулярно, не гасят друг друга никогда!

Для того чтобы осознать весь драматизм возникшей ситуации, необходимо встать на точку зрения ученых первой четверти прошлого века. Ведь, отказываясь от корпускулярной теории света, они имели только один путь — считать свет волнами эфира. О свойствах эфира в то время предпочитали не говорить. Давно прошли времена, когда можно было обсуждать размер и форму частиц эфира и спорить о том, состоит ли он из частиц или является плотной жидкостью. Опыт, этот кумир нового времени, не давал для таких суждений никаких оснований. Ученые поклонялись фактам. Известно лишь, что эфир не препятствует движению тел. Ни вечному вращению планет, ни движению малых тел, ускорения и скорости которых можно изменять и измерять в ходе опытов.

Из аналогии с акустикой было понятно, что эфир, эта тончайшая невесомая среда способна к передаче того процесса, который мы воспринимаем как свет. Знаменитый Ампер, один из основоположников учения об электричестве, еще в 1815 году сказал Френелю, что явления поляризации можно понять, предположив, что световые колебания эфира поперечны, в отличие от звуковых волн в воздухе, частицы которого колеблются вдоль направления распространения звука. Френелю такая мысль показалась совершенно дикой. Ведь поперечные колебания возможны только в твердых телах!

Юнг, узнавший об опытах Араго и Френеля с поляризованным светом, тоже подумал о поперечных колебаниях эфира, но писал лишь о «воображаемом поперечном движении». Был ли он еще напуган приемом, оказанным его соотечественниками теории интерференции, или ему самому мысль о поперечных колебаниях эфира казалась слишком фантастической, нельзя установить ни из его статей, ни из писем. Несколько лет сторонники волновой теории чувствовали свое бессилие перед загадкой поляризации света и старались обходить тупик стороной. Сторонники корпускулярной теории торжествовали.

Скачок

Нужно было иметь величайшее мужество, чтобы в таких условиях сделать шаг, совершенный Френелем. Он решился на это лишь в 1821 году, после многих лет безуспешных попыток.

Свет является поперечными колебаниями эфира, писал Френель. Араго, друг и сотрудник Френеля, отказался присоединиться к такой гипотезе и не захотел быть его соавтором в этой крамольной статье. Ведь, признав поперечность света, он должен был принять и то, что эфир, невесомый и всепроникающий эфир, тверже стали! Тверже стали, но свободно проникает сквозь все тела или свободно пропускает их сквозь себя! Такое казалось невозможным в то время, время абсолютного господства механики. Френелю противостоял объединенный фронт ньютонианцев и сторонников его собственной волновой теории. За последующие несколько лет Френель, работая в полном одиночестве, более того, встречая иногда открытое неодобрение, полностью перестроил свою волновую теорию света.

Теперь, когда в уравнения введены изменения, отражающие поперечный характер световых волн, из них, как следствия, получались описания всех известных явлений, связанных с поляризацией света. Были, конечно, и трудности. Трудности, связанные с эфиром. Для их преодоления Френель ввел одну-единственную гипотезу. Это было огромным скачком по сравнению со всеми вариантами корпускулярной теории света, где

приходилось вводить массу дополнительных гипотез, специфических чуть ли не для каждого нового явления, частично противоречащих одна другой и, несмотря ни на что, обеспечивавших во многих случаях лишь очень приближенные совпадения с опытом.

Единственная гипотеза Френеля состояла в том, что, хотя эфир никак не влияет на движения материальных тел, тела, в которые он проникает, изменяют механические свойства эфира. Чем плотнее тело, тем меньше скорость поперечных колебаний эфира внутри его. Основываясь на такой гипотезе, Френель построил математическую теорию, объяснившую, в частности, многовековую тайну преломления света. Световая волна, переходящая из свободного эфира в эфир, содержащийся в веществе, частично поворачивает обратно и лишь частично проникает внутрь. Если волна падает на границу вещества под углом, то ее отраженная часть уходит от поверхности под тем же углом (Эвклид), а та часть, которая идет внутрь вещества, преломляется в соответствии с законом Декарта — Снеллиуса.

Но в отличие от известных ранее чисто качественных законов формулы Френеля предсказывали, как распределится энергия падающей волны между отраженной и преломленной волнами. И опыт с огромной точностью подтвердил предсказание для всех прозрачных веществ и любых углов падения света на границу вещества.

Из теории Френеля следовала и зависимость скорости света от свойств вещества. Как и в других вариантах волновой теории, и у него скорость света предполагалась максимальной в свободном эфире (в пустоте).

Лишь через четверть века Фуко смог осуществить очевидное доказательство справедливости этого предсказания. Измеренная им скорость света в воде составляла лишь $3/4$ скорости света в воздухе. Но Френель не дожил до триумфа своей теории.

На долю Френеля выпала прекрасная участь бороться и побеждать. Трудности возникали и до его разрыва с Араго в связи с переходом к идее о поперечных колебаниях эфира. Ведь волновая теория, опирающаяся на понятие эфира, в любом варианте должна была ответить на вопрос о движении эфира. Всюду ли он неподвижен, или часть его, находящаяся внутри тел, движется вместе с ними? Еще в 1725 году Бредли, изучая положение некоторых звезд, обнаружил, что во время кульминации, то есть при прохождении через плоскость меридиана, они кажутся отклоненными к югу. Трехлетние наблюдения показали ему, что неподвижные звезды как бы описывают эллипсы на небесной сфере. Бредли правильно объяснил такое явление, позже названное аберрацией, сложением скорости света, идущего от звезды, со скоростью движения Земли по ее орбите. Этим была окончательно доказана конечность скорости света.

Блестящий экспериментатор, Араго понял, что свет звезд может помочь провести решающую проверку справедливости корпускулярной теории света. Он проверил, влияет ли движение Земли на преломление света звезд. Результат оказался отрицательным и убедил Араго в том, что от корпускулярной теории следует отказаться. Но как быть с волновой теорией? Араго обратился с таким вопросом к Френелю.

Компромисс

Ответ гласил: «Да, и отсутствие влияния движения Земли на преломление, и явление аберрации легко объясняются, если считать, что движущиеся тела увлекают за собой эфир, но не полностью, а частично». Эта единственная гипотеза позволила Френелю объяснить все известные в то время оптические явления, связанные с движением тел. Гипотеза подтверждалась и исследованиями открытого позднее эффекта Доплера, заключающегося в изменении цвета излучения или высоты звука в зависимости от движения источника или наблюдателя.

Физо подтвердил гипотезу Френеля, измерив скорость света, проходящего в текущей воде в направлении ее течения и против течения. В конце прошлого века к подобному результату пришел замечательный экспериментатор Майкельсон. Но гипотеза частичного

увлечения казалась многим слишком искусственной. Уже Стокс пытался сформулировать компромиссную гипотезу — в телах эфир увлекается полностью, вдали от них он неподвижен. Однако это было слишком сложно.

Френель давно уже лежал в могиле, и никто из последователей не мог выбраться из противоречий. Несмотря на смятение, результаты проведенных Френелем исследований свойств эфира, имеющих сейчас только исторический интерес, не только сохранили свое значение в оптике, но и легли в основу новой области науки — общей теории упругости, развитой после Френеля такими выдающимися математиками, как Коши, Пуассон, Грин и Ламе.

Однако, как и другие революционные теории, теория Френеля еще долго встречала сопротивление старшего поколения ученых, воспитанных на идеях корпускулярной теории света. Можно сказать, что спекуляция на авторитете Ньютона вызывала застой в оптике, сравнимый, пожалуй, лишь с многовековым оцепенением науки под гипнотизирующим влиянием величия Аристотеля.

Брюстер, совершивший ряд важных открытий в оптике кристаллов, известный каждому школьнику в связи с замечательным углом Брюстера, при котором отраженный луч полностью поляризован, завоевавший популярность среди современников изобретением калейдоскопа, игрушки, ставшей теперь анонимной, Брюстер отрицал теорию Френеля. Ибо она приписывала богу «грубую идею заполнить все пространство эфиром только для того, чтобы создать свет».

Араго был первым, узнавшим от Френеля о необходимости признать поперечность колебаний эфира. Он решительно отверг эту идею и не примирился с ней даже через четверть века, несмотря на упомянутый выше опыт Фуко, подтвердивший важное следствие теории об уменьшении скорости света в телах. Араго справедливо считал, что такой вывод следует и из прежних волновых теорий. Био отрицал теорию Френеля всю свою жизнь. Но все больше молодых физиков следовало за Френелем.

Долой эфир, долой корпускулы!

Лишь один из ученых старшего поколения отдал должное интуиции и настойчивости Френеля. Им оказался ирландский математик и астроном Гамильтон. Ему принадлежат замечательные работы в области теории комплексных чисел и механики. Интересовался он и общими принципами развития науки.

Гамильтон, пожалуй, первым четко выделил две фазы характерные для развития каждой области науки. Сперва человек обнаруживает неизвестные ранее факты и систематизирует их, пока ему не удастся обнаружить в первоначальной груде несвязанных явлений некоторые закономерности, охватывающие группу фактов. Так постепенно наука поднимается до понимания внутреннего единства разнообразных явлений и процессов. После этого может быть построена теория, не только объясняющая с единой точки зрения все известное ранее, но и способная предсказать неизвестные явления и закономерности. Говоря более четким языком, ученый на первой стадии познания восходит от отдельных фактов к законам; на второй стадии он нисходит от законов к следствиям. Орудие первой стадии — индукция и анализ, орудие второй — дедукция и синтез. На первой стадии основную роль играют фантазия и смелость, на второй — логика и строгость.

Френель совершил потрясающий скачок от первой стадии ко второй. Нужно было обладать величайшим воображением и смелостью, чтобы предвидеть поперечные колебания в незримом и неосязаемом эфире, несмотря на очевидные противоречия со здравым смыслом, рождающиеся от этого предположения. Требовалась огромная работа, почти непосильная для человека, страдающего туберкулезом и имевшего лишь инженерную подготовку, для того чтобы создать математическое здание теории и получить из нее следствия, неведомые ранее. Гамильтон и личной склонностью и научной подготовкой

принадлежал к людям, сфера которых — математическая строгость. Его шокировала необходимость признавать за эфиром одновременно и невесомость, и абсолютную твердость. Он не мог примириться с массой противоречивых гипотез корпускулярной теории света. В работе Френеля его привлекало внутреннее единство. Он чувствовал, что упругий эфир, из которого исходил Френель, по существу, является излишним. Гамильтон решил создать формальную математическую теорию света, не связанную ни с какой конкретной моделью. Он хотел, чтобы теория исходила из минимума общих принципов и описывала на их основе все известные факты.

Гасконец

В качестве исходного пункта Гамильтон выбирает принцип Ферма, пришедшего в конце своей жизни к утверждению о том, что свет распространяется по простейшему пути. Ферма, современник Декарта и юрист по профессии, был выдающимся математиком, во многом опередившим своих современников. Среди широкой публики он известен своей великой теоремой, решение которой до сих пор не получил никто. Суть ее очень проста. Ферма утверждал, что простейшее уравнение $x^n + y^n = z^n$, где n — целое число, большее двух, не может быть удовлетворено никакими положительными целыми числами. В справедливости утверждения Ферма может убедиться каждый, стоит только попробовать. Но почему это так?

В свое время за доказательство теоремы предлагалась большая премия, но математики настояли на ее отмене. Они задыхались под обязанностью разбираться в нескончаемом потоке «доказательств», шедших от любителей легких денег, привлеченных кажущейся простотой задачи. Теперь ясно, что теорему Ферма нельзя доказать без создания новых глубоких методов в теории уравнений.

Случилось так, что Ферма прочитал книгу по оптике, написанную его другом де ла Шамбром. Автор выводил в ней законы преломления света, следуя давно забытым утверждениям Герона, жившего за сотню лет до нашей эры. Герон исходил из метафизического принципа, согласно которому природа всегда действует по кратчайшему пути. В четвертом постулате, относящемся к свойствам зеркал, Герон указывает, что из всех лучей, испытавших отражение и соединяющих две точки, минимальны те, которые отражаются под равными углами. Минимальны — значит короче других.

Беда в том, что в ряде случаев, при отражении от вогнутых зеркал свет шел по наиболее длинному пути. Как быть с принципом Герона, столь милым сердцу любителей общих принципов?

Ферма утверждал, что длина пути менее важна, чем простота. Прямая проще кривой. Если рассматривать не все вогнутое зеркало, а прямую, касательную к нему в точке падения света, все станет ясным. По отношению к прямой путь света самый короткий. Так можно примирить четвертый постулат Герона с общим принципом простоты. Ферма немедленно нашел из этого принципа и закон преломления. Но, как и в случае великой теоремы, никто не мог понять, каким образом он это сделал. Ферма обещал де ла Шамбру представить свой путь доказательства по первому требованию, но оттягивал выполнение обещания целых четыре года. Декарт обратил внимание на то, что Ферма был гасконцем. Лишь 1 января 1662 года Ферма доказал, что и гасконцы способны выполнять свои обещания. В новогоднем письме де ла Шамбру он уточняет, что природа стремится не просто к кратчайшему пути, а к пути, проходимому за кратчайшее время! Закон преломления получился с удивительной непосредственностью. Но, к сожалению, Декарта уже не было в живых, и он не мог оценить остроумие гасконца.

И вот Гамильтон поставил своей целью вывести все законы оптики из одного принципа. Он хотел следовать Лагранжу, который построил всю аналитическую механику,

исходя из принципа наименьшего действия. Гамильтон понимал, что этот принцип, как и принцип Ферма, выведен из метафизических соображений об экономии в природе. Но, еще более уточнив формулировку Ферма, он говорит об экстремальном, стационарном или варьируемом действии.

Гамильтону удалось свести математическую формулировку этого принципа всего к двум математическим уравнениям. Из уравнений как простые следствия получались все законы оптики и механики. В них не было ни эфира, ни корпускул. Они давали все то, и только то, что поддавалось опытной проверке.

Может быть, уже здесь следует упомянуть о том, что именно метод Гамильтона лежит в основе современной квантовой механики. Наука наиболее рельефно выявляет связь между поколениями. Научные идеи не признают границ. Но глубоко ошибется желающий сопоставить развитие науки с неуклонным, безостановочным течением могучей реки. Прогресс науки сродни капризному течению горной речки, порой разбегающейся на множество рукавов, застаивающейся в заводях и мчащейся по бурным перекатам.

Самородок

В начале прошлого века тринадцатилетний сын лондонского кузнеца после кратковременного пребывания в начальной школе поступил в обучение к переплетчику. Там он мог утолить свою жажду чтения. Стоит ли думать о том, как сложилась бы его судьба и история науки, если бы ему пришлось обучаться другому ремеслу?

Майкл Фарадей не просто читал, а набирался знаний. Начал посещать публичные лекции. Лекции замечательного химика Дэви покорили юношу, и он послал Дэви письмо с просьбой принять его на работу. Так Фарадей проложил себе дорогу в науку.

Естественно, что, начав работать с Дэви, Майкл стал химиком. Но его тянуло к физике. Отсутствие систематических знаний математики наложило характерный отпечаток на все исследования Фарадея. Он был смелым и гениальным экспериментатором. Некоторые ограничивают его роль именно великими экспериментальными открытиями. Но он был, пожалуй, еще более великим провидцем. Стремился и умел находить общность в казалось бы отдаленнейших областях науки, в совершенно несхожих явлениях. Он был глубоким теоретиком, способным проникать мысленным взором в самую суть вещей и явлений, и формулировал свои мысли в столь четкой форме, что и в словесном выражении они не уступали математическим теоремам. Вот что писал по этому поводу Максвелл: «По мере того как я продвигался вперед в изучении Фарадея, я убедился, что его способ понимания явлений также имеет математический характер, хотя он и не предстает нам облаченным в одежду общепринятых математических формул...»

Фарадей пришел к глубокому убеждению о единстве природы и стремился отыскивать все новые и новые доказательства единства.

«...теперь мы знаем, — писал Фарадей, — что он (магнетизм) действует на все тела и находится в самой тесной связи с электричеством, теплотой, химическим действием, со светом, кристаллизацией, а через последнюю и с силами сцепления».

Фарадей проделал огромное количество опытов, вскрывающих единство того, что он называл силами, а в современной терминологии является различными формами энергии. Но величайшим открытием Фарадея, величайшим после Ньютона, является его теоретический вывод о существовании полей. Он отождествлял поля с материей, считая, что она проникает через все тела и заполняет все пространство.

Пространство Ньютона — пассивное вместилище тел и зарядов. Пространство Фарадея — средоточие явлений, источник и передатчик сил, действующих на тела и заряды.

Внимание! Сейчас последует величайший для всей истории изучения и покорения света вывод. Пространство наполненное силовыми линиями, делает ненужным понятие эфира. Ненужным! Можно представить себе, что свет есть не что иное, как дрожание

силовых линий. «Если допустить такую возможность, — пишет Фарадей, — то можно было бы обойтись без эфира...»

Переводчик — творец

Максвелл поставил перед собой цель — придать идеям Фарадея математическую форму. Максвелл рано пристрастился к математике. Свою первую научную работу он выполнил за год до поступления в университет. В то время ему было лишь пятнадцать лет. Во всем блеске математическое дарование Максвелла проявилось при решении задачи, казавшейся совершенно недоступной обитателям Земли. Речь идет о загадке колец Сатурна, открытых, как мы знаем, еще Гюйгенсом. За века, прошедшие с тех пор, высказывалось множество гипотез о природе этих колец. Но никто не мог предложить способа проверки их истинности. И то, что было и до сих пор остается недоступным для опыта, оказалось решенным на листе бумаги. Максвелл расчетным путем показал, что кольца не сплошные образования — твердые или жидкие. Они должны состоять из множества отдельных тел, вращающихся по близким орбитам. Важное значение для науки имеют и работы Максвелла по кинетической теории газов, но самых ценных результатов он добился, развивая идеи Фарадея.

После долгой и кропотливой работы в период 1860–1875 годов Максвелл создал теорию, в которой электрические и магнитные силы природы объединены в понятие единого электромагнитного поля, включающего видимый свет, невидимые ультрафиолетовые и инфракрасные лучи.

Он свел все известное людям об электричестве и магнетизме к четырем удивительно простым уравнениям. Именно эти уравнения сообщили, что свет — просто электромагнитные волны, способные распространяться в пустом пространстве так же легко, как в прозрачных телах. Причем из уравнений следовало, что эти электромагнитные волны могут существовать сами по себе. Они представляют собой реальность, ранее неведомую людям и внезапно появившуюся перед учеными, как могучий хребет из-за рассеявшегося тумана.

По признанию одного из крупнейших физиков нашего времени, даже «современные представления не могут служить основой для понимания этих электромагнитных колебаний, которые не сводятся к классическому и наглядному представлению о колебаниях материального тела; висящие в пустоте, если можно так сказать, они выглядят для непосвященных (а может быть, даже и для физиков) чем-то довольно таинственным».

Чего же требовать от современников Максвелла! Несмотря на свои невероятные свойства, эфир прочно утвердился в их сердцах, ибо люди, сформировавшие свои взгляды под влиянием ньютоновской физики, идеалом которой было сведение всех явлений к механическому, не могли отказаться от эфира как переносчика световых волн. Не могли поверить в самостоятельную сущность света и других еще неведомых электромагнитных волн.

Теория Максвелла явилась в науке первым этапом немеханической физики, первым этажом в грандиозной пирамиде все усложняющихся абстракций. Мы увидим, что трудности, связанные с освоением новых абстракций, возникнут вновь, когда наступит эра теории относительности и квантовой механики.

Уравнения Максвелла содержали в себе не только описание известных явлений, но и предсказание новых, открытых только впоследствии, в том числе предсказание существования электрической индукции и радиоволн. Они не содержали лишь одного — в них не было ничего относящегося к световому эфиру и его поразительным свойствам. Эфир просто остался за бортом теории Максвелла, но это никак не мешало ей уверенно помогать развитию науки. Для некоторых ученых эфир стал просто синонимом пустого пространства.

Но, несмотря на то, что через двенадцать лет Герц обнаружил на опыте предсказанные

теорией Максвелла электромагнитные волны, возбуждаемые в его приборах, традиции механистической физики не были сломлены. Многие физики упорно продолжали пытаться подвести под теорию Максвелла ходули привычной наглядности. Одни считали электромагнитные поля Максвелла особыми натяжениями эфира, так же как ранее принимали свет за поперечные волны в эфире.

Другие, продолжая считать эфир реальностью, предпочитали забывать о его противоречивых свойствах, относя его в разряд непознаваемых невесомых субстанций.

Жар-птица

Прошлый век перевалил в свою вторую половину под торжественные звуки фанфар. Здание науки уже красовалось многими башнями и казалось построенным на века.

Рассказывают, что один молодой человек, мечтавший заниматься теоретической физикой, поведал о своей мечте Томсону. И тот отговаривал молодого физика, потому что теоретическая физика, по существу, закончена и в ней нечего делать.

Но Томсон ошибался, как ошибались многие и до и после него, считая, что достигли предела знаний, не понимая неисчерпаемости природы, безграничности процесса познания.

Наука манит своих слуг чарующим видом сияющих вершин, и они без усталости карабкаются по каменистым тропам, стремясь ввысь и пренебрегая устрашающими пропастями. Бывает и так: человек строит башню, чтобы с нее видеть дальше и больше. И другие нетерпеливо помогают ему. А у подножия башни образуется зияющий провал, грозящий поглотить строителей и их гордую башню, если они не сумеют вовремя укрепить ее фундамент...

Выдающийся немецкий физик Кирхгоф, уже прославившийся тем, что установил законы распространения электричества по проводам, ничем не отличавшиеся от законов, управляющих течением жидкости по трубам, настойчиво изучал оставшиеся еще не вполне ясными свойства упругих тел. Судьбе было угодно столкнуть его с замечательным химиком Бунзеном, успевшим прославиться изобретением угольно-цинкового гальванического элемента и тем, что с его помощью Бунзен получил металлический магний, литий, кальций и стронций.

Потеряв глаз при взрыве во время одного из опытов, тяжело отравившись мышьяком, Бунзен оставался оптимистом и видел многое, скрытое от других. Он проложил дорогу химии металлоорганических соединений и химии радикалов и стремился создать метод химического анализа, пригодный для контроля металлургических процессов. Здесь основным требованием была быстрота — качество, почти недоступное химии.

Итак, они встретились, и совместная работа закипела. Они начали изучать спектры пламени, окрашенного солями различных металлов, пользуясь спектроскопом и газовой горелкой, специально изобретенной Бунзеном. Эта горелка, существующая поныне, дает почти бесцветное пламя. Ее потомки трудятся и в газовых плитах, и в огромных топках.

После Ньютона не только в лабораториях, но и в светских гостиных увлекались разложением белого света в радужные полосы. Но лишь в самом начале XIX века Волластон соединил призму с узкой щелью в камере-обскуре. Так возник спектроскоп. Спектр получился в нем необычайно ярким, как хвост жар-птицы, цвета были насыщенными, свободными от белесой дымки, мешавшей всем предшественникам Волластона. На фоне радужной полосы Волластон увидел семь темных линий. Он принял их за границы, разделяющие цвета спектра, и не придавал им никакого значения. Мелкий факт, вполне понятный. Что могло быть более обычным, чем границы, в ту пору — пору мелких княжеств и враждующих государств.

Не удивительно, что об этом открытии вскоре забыли. Один из многих печальных случаев в истории науки.

Задумав увеличить яркость изображения при наблюдении спектров, Фраунгофер

соединил воедино зрительную трубу со щелевым спектро스코пом Волластона и направил в свой прибор солнечные лучи. Прекрасный яркий спектр пересекали четкие темные линии... Их были сотни...

Спектроскопы Фраунгофера завоевывали все большую популярность. Многие любовались чарующей симфонией света. Но «смотреть» не означает «видеть». По своему смыслу «видеть» гораздо ближе к «понимать». Именно это имеет в виду англичанин, спрашивая: «You see?»

Никто не может сказать, сколько человек, начиная с Ньютона, рассматривали всевозможные спектры. Несомненно, многие замечали, что окраска пламени связана с появлением в его спектре узких и ярких линий. Возможно, кто-нибудь заметил и то, что желтые линии, порождаемые поваренной солью, возникали и при внесении в пламя других солей натрия. Зеленые линии появлялись не только в присутствии металлической меди, но и при нагревании мельчайших крупинок медного купороса и других солей меди.

Кирхгоф и Бунзен после длительных опытов и раздумий пришли к твердому выводу — Тальбот прав, говоря: «Когда в спектре пламени появляются определенные линии, они характеризуют металл, содержащийся в пламени». Более того, каждый химический элемент характеризуется вполне определенным набором спектральных линий. Эти линии являются своеобразным паспортом химического элемента. Наблюдая их в спектроскоп, можно судить о наличии в веществе данного элемента.

Так родился спектральный анализ.

Вскоре после начала совместных работ Бунзен и Кирхгоф открыли два новых элемента, которым они дали наименования цезий (от латинского «голубой») и рубидий (красный) в соответствии с цветом характерных для этих элементов спектральных линий. Открытие убедительно продемонстрировало мощь нового метода. В развитие и применение спектрального анализа включилось множество ученых.

Один за другим были открыты таллий, индий и галлий — последний предсказан Д.И. Менделеевым на основании его периодического закона.

В спектре Солнца обнаружили линии, не совпадающие с какими-либо из известных на Земле. Так люди познакомились с гелием, лишь впоследствии найденным в земных условиях. Это был триумф. Но, пожалуй, много большее научное и философское значение имел постепенно крепнувший вывод о единстве мира, проявляющемся в том, что вся вселенная состоит из одних и тех же элементов.

В 1888 году Гельмгольц писал, что открытие спектрального анализа вызвало восхищение всех людей и возбудило их фантазию в большей мере, чем какое-либо другое открытие, потому что оно позволило заглянуть в миры, представлявшие нам совершенно недоступными.

Постепенно оказалось, что спектральные линии элементов расположены отнюдь не хаотически, а подчиняются вполне определенным закономерностям. Стало ясно, что закономерности связаны с какими-то особенностями самих элементов. Многие спектральные линии удалось сгруппировать в серии, подчиняющиеся очень простым математическим закономерностям. Удалось обнаружить простые числовые коэффициенты, входящие в формулы для нескольких различных серий, в том числе и таких, которые относятся к различным элементам. Но что означает этот порядок? Вследствие чего он существует? Природа как бы бросала вызов ученым. Как мог пренебречь им Томсон?

Ультрафиолетовая катастрофа

Но не одной этой загадкой тревожила природа умы тех, кто еще не устал от ее сюрпризов. Здесь мы вынуждены отбросить все, что никак не связано со светом. Даже из того, что имеет к нему непосредственное отношение, недостаток места заставляет отбирать лишь самое интересное.

Одна из таких загадок восходит к Кирхгофу. Объяснение природы фраунгоферовых линий привело Кирхгофа к формулировке общего закона, суть которого проста, как просты и другие великие законы природы: способность вещества излучать пропорциональна его способности поглощать и зависит от температуры. Термодинамика, достигшая к тому времени больших успехов, позволяла утверждать, что все тела, находящиеся внутри замкнутой оболочки, должны прийти к тепловому равновесию — достичь одинаковой температуры. При этом не важны ни размеры, ни форма тел или самой оболочки, ни вещество, из которого они состоят. Не требуется и соприкосновения между ними. Равновесие будет обеспечено испускаемым и поглощаемым ими излучением.

Что, если в оболочке, в которой уже установилось тепловое равновесие, проделать небольшое отверстие? Это один из тех простых вопросов, на которые не существует простых ответов. Но если оболочка находится внутри другой замкнутой оболочки, положение упрощается. Между ними начинается обмен энергией, и постепенно их температура выравнивается. В ходе этого обмена через отверстие меньшей оболочки будет проходить излучение, переносящее избыток энергии от более нагретой части к менее нагретой. Если внешняя оболочка горячее, то поток энергии направлен из нее во внутреннюю полость меньшей оболочки, которая поглощает все излучение, как абсолютно черное тело.

Так Кирхгоф пришел к понятию «абсолютно черного тела» и построил его модель в виде камеры с очень малым отверстием. Энергия, выходящая из такого отверстия наружу, определяется только температурой «абсолютно черного тела» и не зависит от вещества, из которого она сделана. Если раскалить модель до высокой температуры, отверстие будет сиять ослепительным белым светом. Это не игра слов, а прямое следствие закона Кирхгофа. Раскаленное «черное тело» должно приходиться в равновесие с окружающими его более холодными телами, для этого оно должно путем излучения передавать внешним телам свою избыточную энергию. Если оно очень нагрето, то излучение должно быть весьма ярким.

Удивительные свойства «абсолютно черного тела» привлекли к нему внимание множества исследователей. Обобщив результаты других ученых и свои собственные, венский физик Стефан показал, что энергия, излученная «черным телом», пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. А это температура, отсчитанная не по шкале Цельсия, а по шкале Кельвина, нуль которой соответствует не температуре таяния льда, а той недостижимо низкой температуре, при которой (по мнению Кельвина) прекращается всякое тепловое движение. Вскоре соотечественник Стефана, один из величайших физиков прошлого века, Больцман, чисто теоретически доказал, что закон Стефана может быть получен без специальных экспериментов, как простое следствие законов термодинамики.

Закон Стефана — Больцмана, как его теперь называют, оказался верным во всем доступном нам диапазоне температур. Он считался одним из величайших достижений физики, хотя... было не очень понятно, какую роль здесь играет переносчик излучения — эфир.

Прошло еще десять лет, и глубокий аналитик Вин довел до конца попытку русского физика В.А. Михельсона определить распределение энергии в спектре «абсолютно черного тела». Исходя лишь из мысленных экспериментов и развивая идеи Больцмана, Вин доказал, что второй закон термодинамики требует, чтобы спектральная интенсивность излучения «черного тела» выражалась некоторой неизвестной ему функцией от произведения длины волны света на температуру «черного тела», причем множителем перед этой функцией должна быть пятая степень его температуры.

То, чего требует второй закон термодинамики, было свято для физиков прошлого века и пребудет истинным во все века. Людям остается лишь пытаться понять, почему так происходит. Из закона, полученного Вином с помощью простых математических операций, получается еще один закон. Вин назвал его законом смещения максимум кривой, изображающей спектр излучения «черного тела», смещается в зависимости от температуры тела. Смещается так, что остается постоянным произведение абсолютной температуры

«черного тела» на длину волны, соответствующей максимуму излучения. И этот закон, полученный лишь на основе законов термодинамики, соблюдается во всех известных нам случаях. Он позволяет определять температуру тел без всяких термометров, лишь с помощью спектроскопа. Так удалось решить, казалось, неразрешимую задачу определения температуры Солнца и звезд.

Вин попытался сделать еще один шаг — определить математический вид функции, входящей в закон излучения «абсолютно черного тела». Полученная им формула требовала, чтобы интенсивность излучения на каждой длине волны стремилась к пределу при повышении температуры. Опыт опроверг такой вывод. Формула Вина совпадала с экспериментом лишь при малых длинах волн и низких температурах. При высоких температурах и больших длинах волн она резко противоречила опыту.

За дело взялся знаменитый Рэлей, который до 1873 года носил фамилию своего отца — Стретт, а затем за научные заслуги получил дворянство и титул лорда Рэля. Рэлей правильно подметил, что трудности определения вида неизвестной функции Вина связаны с тем, что остался за бортом эфир. Рэлей применил к системе, состоящей из вещества и эфира, безупречный классический закон, установленный Максвеллом и Больцманом. Согласно этому закону энергия в любой физической системе распределяется равномерно между всеми степенями свободы системы. Эфир считался непрерывной средой. Значит, он имеет бесконечное число степеней свободы, и это необходимо учесть. Рэлей получил очень простую формулу — спектральная плотность излучения «черного тела» должна быть пропорциональна его температуре и обратно пропорциональна квадрату длины волны, на которой проводится измерение.

За всю свою жизнь прославленный физик не испытывал такого разочарования. Полученная им формула не совпадала с результатом опыта. Вместо известной всем колоколообразной кривой, вершина которой определяется законом смещения Вина, его формула, совпадая с опытом на длинноволновом склоне кривой, требовала бесконечного роста энергии по мере укорачивания длины волны. Ведь квадрат длины волны стоял в ней в знаменателе! Этот вывод вошел в историю науки как «ультрафиолетовая катастрофа».

Но это был не единственный абсурдный вывод, следовавший из формулы Рэля. Ведь любая конкретная порция материи содержит конечное число степеней свободы, а число степеней свободы эфира бесконечно в любом объеме. Значит, в соответствии с формулой Рэля вся энергия должна перейти в эфир, а вещество должно остыть до абсолютного нуля. Хуже всего то, что вина лежала не на формуле Рэля. Формула лишь вскрыла то, что оставалось скрытым в самих основах классической физики. Вдобавок ко всему Лоренц показал, что даже простая пропорциональность интенсивности излучения при абсолютной температуре должна приводить к абсурду.

Так великие творцы величественного здания классической физики обнаружили под его фундаментом зыбучие пески. Так XIX век закончился трагедией, научным тупиком, из которого не было выхода. Все казалось безупречным: и основные принципы, проверенные многовековым опытом, и математические преобразования, основанные на незыблемых аксиомах. До сих пор они всегда приводили к предсказаниям, подтверждавшимся опытом. А если случались расхождения, то всегда обнаруживались погрешности в опыте, или в вычислениях, или в каких-то дополнительных предположениях, не имевших отношения к основам науки.

Здесь же было не так. Порок лежал в самих основах. Но в чем он состоял и как его устранить, оставалось неясным.

Приближался следующий век.

Глава II. Предтечи

Призраки

Не без пользы прошел XIX век. Велики его результаты. Гордый, вознесшийся на триста метров шпиль Эйфелевой башни не только символизирует достижения техники века. Он в буквальном смысле опирается на механику и теорию упругости, на математику и спектральный анализ, давшие возможность рассчитать конструкцию башни и сварить ее сталь. Техника — дитя науки, она не рождается из вдохновения поэта.

Рубеж века не обнаружишь ни среди годовых колец тысячелетних секвой, ни в напластованиях земных слоев. Не отмечен он и в космосе на бесконечной спирали, описываемой нашей Землей, летящей вместе с Солнцем по его огромной орбите вокруг центра Галактики. А куда мчится сама Галактика? Но мы, столь ничтожные на фоне этого величия, любим создавать себе поводы к торжествам. Хотя бы для того, чтобы скрасить однообразие будней. И установив началом веков далеко не достоверный день рождения Христа, и разработав десятиричную систему счисления...

Одним словом, наша история подошла к рубежу XX века.

Итак, что же добавил XIX век наиболее существенного в интересующую нас область учения о свете? Прежде всего — закон сохранения и превращения энергии, интуитивно предвиденный еще великим Ломоносовым и положивший начало термодинамике. Затем электромагнитную теорию Максвелла, включившую в себя волновую оптику Френеля и породившую электронную теорию Лоренца.

Не так уж мало для одного века! Он не прошел впустую. А ведь были достижения поменьше, но вполне достойные того, чтобы в разряде эпохальных пребывать в веках. Вечно будет в строю вариационный метод Гамильтона, никогда не останутся без дела спектральный анализ и радиоволны...

Однако не только благополучием и победами встречали ученые приближение нового века. С ними оставался призрак эфира, грозивший разделить непроходимой пропастью механику и электродинамику. Оставался призрак «ультрафиолетовой катастрофы», противопоставлявший электродинамику термодинамике. Новорожденный электрон выглядел чуждым остальной материи. Да и привычное вещество подавало непонятные сигналы, зашифрованные в ярких линиях спектра и говорившие ученым лишь одно — вы почти ничего не знаете!

Кванты

Вильгельм Вин, автор закона смещения, получившего его имя, и Макс Планк, берлинский профессор, уже завоевавший известность трудами по термодинамике, нашли способ избавить физику от призрака «ультрафиолетовой катастрофы». Вернее, раскинув математический пасьянс, они обнаружили надежду на выход. Они выдвинули предположение о том, что интенсивность излучения «черного тела» не растёт, как в формуле Рэлея, а уменьшается с длиной волны. Они даже нащупали для этого уменьшения определенную закономерность. Но ни самопредположение, ни экспоненциальный вид закономерности не следовали ни из чего, кроме как из необходимости согласовать свойства излучения с фактом существования мира, не охлажденного до абсолютного нуля, несмотря на роковой закон Вина.

В 1899 году эксперимент подтвердил новый закон Вина — Планка, и, казалось, одна из химер умирающего века исчезнет вместе с ним. Но более точные измерения Луммера и Принггейма привели к большим отклонениям от закона Вина — Планка. Все начиналось вновь. И Планк снова принялся за работу.

Расчеты Планка подтвердили ужасный вывод: мир ожидает ультрафиолетовая смерть. Но в окружающей жизни физики не находили ни малейшего симптома столь печального исхода. Они должны были избавиться и теорию от нелепого заблуждения. Этой проблемой

мучился не один Планк. Многие ученые не хотели мириться с бессилием созданных ими формул.

Но первая удача пришла к наиболее подготовленному. Ведь речь шла о примирении термодинамики и электродинамики, о связи между энергией и частотой излучения. Закону распределения Вина соответствовала одна связь между ними, формула Рэля давала другую. Из этого разрыва ухмылялась ультрафиолетовая смерть.

19 октября 1900 года Планк доложил немецкому физическому обществу о том, что он нашел формулу, связывающую, казалось, несовместимые высказывания Вина и Рэля. Новая формула давала формальный выход из драматической ситуации, но, как и предыдущая формула Вина — Планка, она не имела фундамента ни в термодинамике, ни в электродинамике.

Но недаром имя Планка до сих пор произносится с благоговением. Планк окончательно избавил физику от призрака «ультрафиолетовой катастрофы».

«После нескольких недель самой напряженной работы в моей жизни тьма, в которой я барахтался, озарилась молнией, и передо мной открылись неожиданные перспективы», — говорил впоследствии Планк в своем нобелевском докладе.

Молния, о которой он говорил, озарила целую область знаний о природе вещества. Это случилось в том же 1900 году. Рассматривая процесс обмена энергией между раскаленным телом и окружающим пространством, Планк предположил, что обмен совершается не непрерывно, а в виде небольших порций. Описав этот процесс математически, он пришел к формуле, в точности совпадавшей с распределением энергии в спектре Солнца и других нагретых тел. Так в науку вошло представление о минимальной порции энергии — кванте.

С самого рождения квант оказался капризным младенцем. Введенный Планком в расчет в качестве кванта энергии, он появился в окончательной формуле в виде кванта действия — величины, являющейся произведением энергии на время. Причина этой трансформации оставалась неясной. Постепенно Планк, а вслед за ним и другие ученые примирились с дискретностью энергии, но дискретность механического действия долго оставалась непостижимой.

Загадку решил Эйнштейн. Он пришел к выводу, что квантовая теория Планка, созданная только для объяснения механизма обмена тепловой энергией между электромагнитным полем и веществом, должна быть существенно расширена. Он установил, что энергия электромагнитного поля, в том числе и световых волн, всегда существует в виде определенных порций — квантов.

Так Эйнштейн извлек квант из его колыбели и продемонстрировал людям его поразительные возможности. Представление о кванте света (фотоне) как об объективной реальности, существующей в пространстве между источником и приемником, а не о формальной величине, появляющейся только при описании процесса обмена энергией, сразу позволило ему создать стройную теорию долго мучившего ученых фотоэффекта и других загадочных явлений. Это подвело фундамент и под зыбкую в то время формулу Планка. Когда Эйнштейн смело допустил, что электромагнитная энергия всегда существует в виде квантов, стало уже трудно предположить, что она взаимодействует с веществом не квантами, а непрерывно, как думали до Планка.

Квантовая теория света, успешно справившаяся с загадкой фотоэффекта, отнюдь не была всесильной. Наоборот, она была совершенно беспомощной в попытках описать ряд общеизвестных явлений. Например, таких, как возникновение ярких цветов в тонких слоях нефти, разлитой на воде, или существование предельного увеличения микроскопа и телескопа. Волновая же теория света, бессильная в случае фотоэффекта, легко справлялась с такими вопросами. Это вызвало непонимание и длительное недоверие к квантовой теории света. Ее не принял и отец квантов Планк.

Недоверие Планка к теории фотонов было столь велико, что побудило его даже к отказу от своей собственной теории квантов. Он надеялся при помощи компромисса примирить свое тяготение к классическим традициям с настоятельными требованиями

опыта. Ему казалось, что все будет спасено, если принять, что свет распространяется и поглощается в соответствии с классическими волновыми законами, а дискретность есть свойство вещества, и квантование энергии возникает лишь в процессе излучения света веществом. Планк изложил эту точку зрения в докладе Сольвеевскому конгрессу, состоявшемуся в 1911 году.

Эйнштейн не придавал трагического значения такому противоречию. Наоборот, он считал его естественным, отражающим сложный, многогранный (мы сказали бы — диалектический) характер природы света. Он считал, что в этом проявляется реальная двойственная сущность света. А постоянная Планка играет существенную роль в объединении волновой и квантовой картины. Она воплощает в себе союз волн и частиц.

Связь между частотой света и энергией фотонов, существование которых было предсказано, а по существу, открыто Эйнштейном, не укладывалась в представления, неотделимые от всего древа классической науки.

Не удивительно, что все думающие физики пытались осознать эту связь на причинной основе. (Не думающие физики просто отмахивались от крамольной теории световых квантов.)

Вот одна из попыток, о которой через полвека в шуточной форме вспомнил ее автор, замечательный физик Макс Борн.

Вообразите несколько яблонь, у которых длина плодоножек, на которых висят яблоки, обратно пропорциональна квадрату высоты над землей. Если тряссти яблоню с определенной частотой, то яблоки, висающие на определенной высоте, раскачаются в резонанс и упадут вниз. Они долетят до земли с кинетической энергией, пропорциональной высоте, с которой они упали. Значит, эта энергия пропорциональна частоте. Ведь резонансная частота, приводящая к падению яблока, пропорциональна высоте, ибо она зависит от длины подвеса-плодоножки, играющей роль длины подвеса маятника, грузом которого служит яблоко.

Вы скажете, что такое рассуждение наивно. Да, оно кажется наивным через пятьдесят лет, но в то время отец квантов Планк воспроизвел его в своей лекции.

Как мы увидим позже, распространив идеи Эйнштейна на микрочастицы, французский физик Луи де Бройль заложит основы волновой механики — одного из краеугольных камней фундамента современной квантовой физики.

При создании теории фотоэффекта и гипотезы световых квантов проявилась особенность гения Эйнштейна — вместо введения частных гипотез, отвечающих на конкретные вопросы, давать революционные решения, одновременно проясняющие множество сложных и разнообразных проблем. Эта черта во всем блеске проявилась в основном деле жизни Эйнштейна — в создании теории относительности, приведшей к революции в современной науке.

АТОМЫ

Таинственные закономерности спектральных серий постепенно ложились все более тяжким грузом не только на специалистов по спектральному анализу, но и на склонных к обобщениям мыслителей, стремившихся превратить неупорядоченные груды фактов в строгую конструкцию теории.

Вот эти факты.

1870 год. Стони обратил внимание на то, что частоты трех главных линий спектра водорода относятся как целые числа — 20:27:32.

1871 год. Стони вместе с Рейнольдсом установили, что частоты линий спектра хлористого хрома находятся в простых отношениях с совершенно неожиданными величинами — частотами гармонических колебаний скрипичной струны.

1885 год. Бальмер показал, что числа, полученные Стони, — частный случай более общего закона, в выражение которого входит одна большая постоянная величина, число 2, и

переменная величина, принимающая целочисленные значения 3, 4, 5 и т.д.

Работа Бальмера вызвала резонанс в умах экспериментаторов. Через несколько лет Ридберг нашел подобные закономерности, объединяющие серии линий в спектре таллия и в спектре ртути. А затем Кайзер и Рунге начали фотографировать спектры с целью упростить процесс измерения, и непонятные закономерности посыпались как из рога изобилия.

Первое десятилетие XX века не изменило положения. Оно, пожалуй, только еще больше запуталось, когда в 1904 году Лайман нашел новую серию спектральных линий водорода в ультрафиолетовой части спектра, невидимой глазу, а в 1909 году Пашен обнаружил столь же невидимую серию в инфракрасной части спектра водорода.

Самым удивительным было то, что эти новые серии описываются формулами, очень похожими на формулу Бальмера, а большая постоянная величина, входящая в них, оказалась в точности одинаковой. Расхождение не наблюдалось и в миллионной доле ее! Такое не могло быть случайным. Теперь эта величина называется постоянной Ридберга.

В 1908 году Ритц, пытаясь выяснить характер спектральных закономерностей, уловил странные связи между числами, характеризующими частоты спектральных линий. Оказалось, что простым сложением или вычитанием частот каких-либо двух линий можно получить частоту третьей линии. Так были найдены новые, ранее неизвестные, слабые спектральные линии. Правда, не все предсказания подтверждались. Но хотелось думать, что отсутствующие линии просто очень слабы и в будущем их удастся обнаружить.

Многим в то время уже было ясно, что в спектральных сериях зашифрованы сокровенные тайны атомов. Пуанкаре, обсуждая спектральные закономерности, напоминающие законы колебаний струн, мембран и органических труб, и признавая бессилие науки перед этими фактами, писал: «...я думаю, здесь заключена одна из самых важных тайн природы». Цыпленок нового закона отчетливо стучал в скорлупу, но никто не мог помочь ему пробиться к свету.

Загадка атома пришла к нам из глубокой древности, и XIX век лишь усложнил ее, не дав никакой надежды на ее решение.

Демокрит приписывал атомам только два свойства — величину и форму, Эпикур добавлял третье — тяжесть. Но века не могли подтвердить или опровергнуть догадки древних. Периодически ученые то увлекались идеей делимости вещества, то пренебрегали ею.

В самом начале XIX века Риттер предположил, что не только вещество, но и электричество состоит из атомов. В середине века Вебер писал о том, что движение атома электричества вокруг материального ядра может объяснить оптические и тепловые эффекты. В 1881 году Стони рассчитал величину атома электричества. Забавно, что эта величина в течение десяти лет существовала безымянной, пока ее отец Стони не дал ей имя «электрон».

Тучные годы

Кто из безымянных авторов библии придумал притчу о семи тощих и семи тучных коровах? Урожайные годы бывают не только на полях, но и в лабораториях. В 1895 году Попов изобрел радио. Тогда же Перрен вместе с Липманом обнаружили отрицательный заряд катодных лучей Крукса и тем положили начало электронике. (Много лет спустя, наш замечательный современник академик А.И. Берг объединил этих близнецов в синтетическую науку — радиоэлектронику.) В том же году Рентген, поддавшись всеобщему увлечению исследованием катодных лучей, открыл новые икс-лучи, впоследствии названные его именем.

Следующий, 1896 год тоже принадлежал к тучным. Анри Беккерель, внук известного физика Антуана Беккереля, продолжал исследования свечения солей урана, таинственного явления, ставшего главным увлечением его отца Эдмона Беккереля. Оказывается, и в физике существуют династии: сын Анри Беккереля, Жан, тоже был известным физиком.

Но возвратимся к Анри Беккерелю, изучавшему люминесценцию ураниловых солей, которые ярко светились в темноте, если их до того выставляли под лучи солнца. Он открыл, что невидимое излучение солей урана не связано с предварительным освещением.

Узнав, что недавно открытые икс-лучи вызывают утечку электрического заряда с заряженного тела, Беккерель решил проверить, не способно ли к этому же открытое им излучение. Опыт подтвердил его догадку. Теперь он мог пользоваться двумя методами — фотографическим и электрическим. Прошло лишь два года, и супруги Кюри обнаружили, что торий обладает теми же свойствами, что и уран. Они ввели термин «радиоактивность» для обозначения особого свойства тех веществ, которые способны испускать «лучи Беккереля». Заметив, что некоторые минералы радиоактивнее тория и урана, они начали искать причину этого и обнаружили полоний, названный так в честь родины Марии Кюри, а затем радий, наиболее радиоактивный из всех известных до того. На рубеже нашего века Беккерель обнаружил, что его лучи отклоняются магнитом, а Резерфорд, о котором мир узнал лишь впоследствии, установил, что эти лучи состоят из двух частей. Он назвал одну из них альфа-излучением, она сильно поглощалась веществом, а другую бета-излучением, она поглощалась значительно слабее.

Вскоре Вийяр обнаружил еще более проникающую компоненту, совсем не отклоняемую магнитом. Он назвал ее гамма-излучением.

Постепенно было установлено, что альфа-лучи заряжены положительно, бета-лучи отрицательно, а гамма-лучи совсем не несут заряда, чем напоминают лучи Рентгена. Удалось установить поразительный факт: частицы бета-лучей имели различные скорости, а отношение их заряда к массе менялось со скоростью частиц. Это заставило вспомнить о старой мысли Абрагама, считавшего возможным, что масса электрона, по крайней мере частично, зависит от электромагнитного поля. Не являются ли бета-лучи электронами и не прав ли Абрагам?

Радиоактивные процессы возникают в самых глубинах атомов. При этом одновременно выделяется тепло. Пьер Кюри вместе с Лабордом изучили процесс и двумя способами определили, что каждый грамм радия ежечасно выделяет 100 калорий энергии. Откуда она берется?

Еще раньше Мария Кюри предположила, что тепло выделяется радиоактивным веществом во время испускания лучей Беккереля, и при этом радиоактивные вещества очень медленно изменяются. Но такая гипотеза противоречила всем основам науки — закону сохранения энергии (откуда берется эта энергия?), закону сохранения вещества (как может изменяться радиоактивное вещество?) и интуитивному многовековому представлению о неизменности атомов.

Испугавшись собственной смелости, Мария выдвинула вторую гипотезу: радиоактивные вещества улавливают неизвестное внешнее излучение, недоступное нашим приборам, и преобразуют его в тепло и энергию радиоактивного излучения.

Время показало, что и в науке безграничная смелость иногда лучше робкой осторожности. Все три грозных возражения против первой из гипотез превратились в ее незыблемые доказательства.

Дерзкий японец

Исследования радиоактивности привели к открытию радиоактивных превращений атомов. Эйнштейн выявил глубокую связь между энергией и веществом и объединил два старых закона в единый закон сохранения энергии и вещества, в закон сохранения материи. Один из замечательных примеров того, как глубоко законы физики связаны с общими положениями диалектического материализма.

Все явственнее назревала необходимость осознать сложные законы радиоактивных превращений, представлявших ученым массой несвязанных эмпирических гипотез.

Особенно настоящим это стало после 1908 года, когда Резерфорд установил, что альфа-частицы, вылетающие из радиоактивных веществ, представляют собой ионизированные атомы гелия. Гелий получается из радиоактивных элементов! Столь крамольная возможность стала реальностью.

Нужно было решиться приступить к решению загадки атома. До того существовало лишь весьма общее предположение Праута о том, что атомы всех веществ каким-то образом образуются из водорода. Гипотеза, основанная на кратности атомных весов, верность которой стала сомнительной после уточнения измерений атомных весов ряда элементов, обнаруживших существенное отклонение от кратности. (Впоследствии, после открытия изотопов, это возражение отпало, однако гипотеза Праута уже была не нужна.)

Первую модель атома предложил Джозеф Джон Томсон, знаменитый Джи-Джи, которого иногда путают с не менее знаменитым Вильямом Томсоном, впоследствии получившим титул лорда Кельвина.

Короткое время Джи-Джи считал, что хорошей моделью атома могут служить магнетики Майера. Майер подвешивал над сосудом с водой большой магнит, а на воду пускал маленькие пробочки с воткнутыми в них намагниченными иглами. Маленькие магнетики устанавливаются в устойчивые конфигурации: один в центре, под большим магнитом, вокруг него шесть магнетиков, образующих правильный шестиугольник, затем десятиугольник больших размеров и вокруг него двенадцати угольник. Майер заметил, что, покачивая большой магнит, можно заставить маленькие магнетики переместиться. И тогда внешние конфигурации превращаются в девяти- и тринадцатигульники. Майер считал, что это напоминает поведение некоторых реальных тел, способных изменять свои свойства при затвердевании.

Впрочем, вскоре Томсон понял, что эта модель слишком сложна и не может описать многие известные свойства атомов.

В игру включился Вильям Томсон. Он заметил, что опыты с лучами Крукса и бета-частицами свидетельствуют о том, что электроны пролетают не только между атомами, но и сквозь них. Он предполагал, что электрон, находящийся вне атома, притягивается к нему с силой, пропорциональной квадрату расстояний между их центрами. Если же электрон пролетает внутри атома, то притяжение пропорционально первой степени этого расстояния. Так могло быть, только если весь объем атома заполнен чем-то, имеющим положительный заряд, а размеры электронов много меньше размеров атомов.

Кельвин считал, что нейтральность атома обеспечивается тем, что в нем существует ровно столько электронов, сколько нужно для компенсации положительного заряда. Они располагаются по сферическим поверхностям и, возможно, вращаются вокруг центра.

Такая модель, известная под названием «атома Томсона», просуществовала более десятилетия, хотя было ясно, что она не объясняет многих фактов и не отвечает требованиям устойчивости. Так еще раз проявила свою иронию Ее Величество Наука, милостивая к корифеям, покорно несущим ее шлейф, и пренебрегающая провидцами, обгоняющими ее неспешную величественную процессию.

В декабре того же 1903 года, когда оба Томсона, более молодой Джи-Джи и маститый лорд Кельвин, закончили в общих чертах построение своей модели атома, японский физик Нагаока сообщил Токийскому физико-математическому обществу о своей модели атома, построенной наподобие системы Сатурна и его колец. В следующем году это сообщение появилось в лондонском журнале «Природа», но не вызвало особого резонанса среди физиков. Сейчас мы можем лишь удивляться подобному невниманию и пытаться объяснить его гипнотизирующим влиянием авторитета, инерцией ума или традиционной ссылкой на судьбу идей, опередивших свое время.

Нагаока исходил из ясно осознанной необходимости объяснить закономерности спектральных серий и явления радиоактивности. Его статья называлась «О динамической системе, иллюстрирующей спектральные линии и явление радиоактивности». Он писал: «Атом состоит из большого числа частиц одинаковой массы, расположенных по кругу через

равные угловые интервалы и взаимно отталкивающихся с силой, обратно пропорциональной расстоянию между ними. В центре круга помещается тяжелая частица, которая притягивает другие частицы, образующие кольцо, по тому же закону... Рассмотренная система будет реализована, если по кольцу разместятся электроны, а положительный заряд в центре».

Модель Нагаоки могла объяснить сильные отклонения альфа-частиц, наблюдавшиеся Гайгером и Мерсоном при прохождении альфа-частиц через тонкие металлические фольги. Модель атома Томсона была здесь бессильна. Несмотря на все это, планетарная модель атома прочно ассоциируется с именем Резерфорда, который возродил ее в 1913 году, когда пришло время, и при его участии были получены опытные факты, превратившие планетарную модель из гипотезы в очевидную необходимость.

Один из решающих доводов в пользу планетарной модели получил ассистент Резерфорда Мозли из наблюдения спектров рентгеновских лучей: «Атому присуща характерная величина, регулярно увеличивающаяся при переходе от атома к атому (в периодической системе). Эта величина не может быть ничем иным, как зарядом внутреннего ядра».

Результат, полученный Мозли, прекрасно сочетается с законом превращения радиоактивных элементов, открытым Соди и Резерфордом за десять лет до того и вызывавшим резкие возражения консервативных сторонников традиционной точки зрения о вечности и неизменности атомов.

В модели Резерфорда все встало на свои места — в положительно заряженном ядре происходят все радиоактивные превращения, вокруг ядра вращаются электроны, ответственные за возникновение спектров и за химические взаимодействия.

Основной слабостью планетарной модели Нагаоки, не устраненной и Резерфордом, была невозможность количественно связать эту модель с явлением излучения и поглощения света и рентгеновских волн. Модель не позволяла рассчитать длины излучаемых и поглощаемых волн, более того, ее нельзя было примирить с фактом существования атомов. Ведь в соответствии с теорией Максвелла вращающийся по орбите электрон должен непрерывно излучать электромагнитные волны, передавая им часть своей кинетической энергии. При этом орбита электрона должна все более сжиматься и он должен быстро упасть на ядро.

Если и была надежда когда-нибудь в будущем объяснить этим радиоактивные превращения, то совместить такую модель с существованием стабильных атомов было совершенно невозможным.

Модель Резерфорда ждала неизбежная гибель. Но она не успела подвергнуться поруганию и забвению потому, что в лаборатории Резерфорда уже около года работал молодой датский физик Нильс Бор.

Атом бора — это не атом бора, а атом водорода

Бор отчетливо ощущал обширные возможности, содержащиеся в планетарной модели атома, и поставил себе целью спасти ее от анафемы, которой ей грозила классическая физика.

Спасителями могли быть только еретический квант действия, вошедший в науку, несмотря на все опасения его создателя Планка, и не менее крамольный фотон, отец которого — Эйнштейн — потом долгие годы был основным оппонентом Бора по самым сложным и глубоким проблемам современной физики.

Цитата, возможно слишком длинная, лучше всего покажет возникновение наиболее драматического скачка, вознесшего человечество над стройными громадами классической физики.

«Существование элементарного кванта действия выражает новое свойство

индивидуальности физических процессов, совершенно чуждое классическим законам механики и электромагнетизма; оно ограничивает их справедливость теми явлениями, в которых величины размерности действий велики по сравнению со значением единичного кванта, даваемым новой атомистической постоянной Планка. Такое условие ни в какой мере не выполняется для электронов в атомах, хотя ему с избытком удовлетворяют явления в обычных физических опытах. И действительно, только существование кванта действия препятствует слиянию электронов с ядром в нейтральную тяжелую частицу практически бесконечно малого размера.

Признание такого положения тотчас же навело на мысль описывать удержание каждого электрона полем вокруг ядра как непрерывный ряд индивидуальных процессов, которые переводят атом из одного, из так называемых его стационарных состояний, в другое такое же состояние с испусканием освобожденной энергии в виде единичного кванта электромагнитного излучения. Эта идея внутренне сродни эйнштейновскому успешному толкованию фотоэлектрического эффекта, столь убедительно подтвержденному прекрасными работами Франка и Герца над возбуждением спектральных линий ударами электронов об атомы. Она дала не только прямое объяснение загадочных законов линейчатых спектров, распутанных Бальмером, Ридбергом и Ритцем, но и постепенно привела к систематической классификации, на основе спектроскопических данных, типов стационарной связи каждого электрона в атоме; это дало полное объяснение замечательным зависимостям между физическими и химическими свойствами элементов, — зависимостям, выраженным в знаменитой таблице Менделеева. Такое толкование свойства материи казалось осуществлением древнего идеала — свести формулирование законов природы к рассмотрению только чисел, — превосходящим даже мечты пифагорейцев. Основное предположение об индивидуальности атомных процессов означало в то же время неизбежный отказ от установления детальной причинной связи между физическими событиями, существование которой было в течение столетий бесспорной основой философии естествознания».

Бор сформулировал свои идеи в виде трех постулатов:

- *атом может находиться в ряде определенных стационарных состояний, не теряя энергии на излучение;*
- *излучение возникает при переходе из одного стационарного состояния в другое;*
- *частота излучения определяется разностью энергий, соответствующих двум стационарным состояниям, между которыми совершается переход, и постоянной Планка.*

Бор применил эти постулаты к простейшему атому, атому водорода, вокруг ядра которого вращается только один электрон. Каждый шаг был триумфом. Радиус орбиты электрона хорошо совпал с радиусом атома водорода, известным из опытов с газами. Подсчет частот, связанных с переходами между простейшими стационарными состояниями, совпал с известными сериями линий Бальмера и Пашена и позволил вычислить постоянную Ридберга, определенную ранее только из опыта.

Бор применил свою теорию к иону гелия — системе, также имеющей только один электрон, но вчетверо более тяжелое ядро, чем ядро атома водорода. Бор получил серию частот, совпавшую с серией спектральных линий, наблюдавшихся в некоторых звездах и в то время приписывавшихся водороду. Впоследствии правота Бора стала еще одним триумфом его теории.

Но попытки применить теорию к неионизированному атому гелия — системе с двумя электронами — и к более сложным атомам натолкнулись на непреодолимые математические трудности.

Эти трудности в существенной мере преодолел теоретик старшего поколения Зоммерфельд. Он ввел в модель Бора наряду с круговыми орбитами более сложные эллиптические орбиты электронов. Это позволило ему вывести расчетным путем

комбинационный принцип, полученный Ритцем из простого сопоставления данных опыта. Затем Зоммерфельд, оценив скорости движения электронов по их орбитам, установил, что они столь велики, что для расчетов нужно применять теорию относительности Эйнштейна.

Так он смог объяснить существование многих спектральных линий, не входивших в известные спектральные серии. Оказалось, что они возникают вследствие того, что эллиптические орбиты в соответствии с требованиями теории относительности вращаются вокруг ядра так, что электрон движется не по замкнутому эллипсу, а по своеобразной бесконечной розетке. Впрочем, и после усовершенствования теория была слишком сложной, а главное — не все ее предсказания согласовывались с опытом.

Постепенно у физиков крепло сознание необходимости радикальных перемен.

По закону случая

Если будущий историк захочет «установить, когда именно ученые, более двух тысячелетий проникавшие в сущность света и атомов, сделали первый непосредственный шаг к лазерам, он, несомненно, снова вспомнит о тучных годах.

В 1917 году Эйнштейн сделал шаг, последствия которого он еще не мог предвидеть. Шаг заключался в применении к атому Бора того статистического подхода, который сам Эйнштейн и польский ученый Смолуховский применили к расчетам таинственного броуновского движения — безостановочной пляске мельчайших частиц.

Эйнштейн заметил, что акты излучения и поглощения света должны подчиняться таким же вероятностным закономерностям, как радиоактивный распад. Каждый единичный акт непредсказуем и случаен, но в среднем проявляются четкие закономерности, соответствующие объективным законам природы.

Он предположил, что в атомах, не подвергающихся внешним воздействиям, электроны переходят из состояний с более высокой энергией в состояния с более низкой энергией со вполне определенной вероятностью, обусловленной строением атома. Интенсивность излучения, связанного с такими спонтанными — самопроизвольными — переходами, пропорциональна числу атомов, находящихся в состоянии с высокой энергией, — возбужденных атомов.

Если же атомы находятся в поле излучения, частота которого совпадает с одной из боровских частот, то вероятность электронного перехода, связанного с излучением или поглощением фотона этой частоты, пропорциональна интенсивности поля.

Эти два предположения имели два важнейших следствия.

Из них непосредственно вытекает формула Планка для излучения «черного тела», устранившая опасность ультрафиолетовой катастрофы». Это давало уверенность в правоте Эйнштейна.

Но второе следствие настораживало.

Из предположений Эйнштейна неизбежно получалось, что фотон уносит из атома не только энергию, но и импульс; что элементарный акт излучения света не может быть описан сферической волной. Так в науку вновь вошла необходимость объединения волновых и корпускулярных свойств света, ибо теперь фотоны, обретя импульс, опять уподобились частицам. Теперь в физику по-настоящему вторглись законы случая и их нельзя стало рассматривать просто как путь упрощения слишком громоздких вычислений в задачах о множестве частиц. Вероятностные законы оказались связанными с элементарными единичными актами. Лишь много позднее выяснилось, как все это связано с лазерами. Но прежде в науке должно было произойти много важных событий.

Три шедевра

Был 1911 год. В науку входил один из интереснейших умов. Луи де Бройль начал свою самостоятельную жизнь с получения степени бакалавра, а затем лицензиата литературы по разделу истории. Но его влекла деятельность, которой посвятил себя его брат. И вот через брата Луи знакомится с докладами, обсуждавшимися на физическом конгрессе. Доклады были посвящены квантам. Кванты решили судьбу юноши.

Начал он с того, что стал работать в лаборатории своего брата. Первые его труды посвящены рентгеновскому излучению и фотоэффекту. Истории было суждено прервать своеобразный старт — началась первая мировая война. Историк-физик-солдат пять лет отдает армии. А вернувшись в 1919 году из армии, он полностью подпадает под обаяние эйнштейновской теории световых квантов. Его подхлестнуло именно то, что маститым немецким физикам казалось подозрительным в дерзкой теории.

Эйнштейн и не претендовал на то, чтобы объяснить при помощи квантов появление цвета в тонких пленках — например, радужной окраски разлитой по воде нефти — и других интерференционных явлений. Если считать, что свет — только частицы, этого не объяснишь. Он слишком глубокий физик, чтобы пытаться так делать. То была бы грубая работа.

Творец световых квантов оставлял эту задачу волновой оптике. Ей было легче, так как исходила она из того, что свет — волна. Но однобокость каждой из теорий не пугала Эйнштейна. Он считал такую двойственность закономерной и лежащей в основе природы света. В одних условиях свет существует как непрерывная волна, а в других он не менее реально выступает как поток квантов, которые позднее получили название фотонов.

Эйнштейн был одинок в своем подходе к природе света. Даже впоследствии, когда он после создания теории относительности был поставлен рядом с Ньютоном, квантовая теория света осталась непонятой и забытой. Она помогла Бору в создании теории атома, но и это не обеспечило ей признания. Сам Эйнштейн, поглощенный все более трудными задачами, возникавшими по мере развития его основного труда, не возвращался к этим работам.

Луи де Бройль подхватил идеи Эйнштейна. Еще в ранней молодости его поразила аналогия уравнений, управляющих движением волн и поведением сложных механических систем. Теперь же непостижимое появление целых чисел в правилах, позволяющих вычислять орбиты атома водорода, навело его на мысль о родстве этих правил с законами волнового движения, в которых постоянно возникают простые целые числа.

Руководствуясь идеями Эйнштейна, в частности его соображениями о связи массы и энергии, вытекающими из теории относительности, де Бройль проделал для частиц работу, обратную той, которую Эйнштейн провел для волн света. Эйнштейн связал электромагнитные волны с частицами света; де Бройль связал движение частиц с распространением волн, которые он назвал волнами материи. В конце лета 1923 года в «Докладах Французской академии наук» появились три статьи, три шедевра, в которых были заключены основные принципы новой волновой механики.

А в докторской диссертации идеи волновой механики были развиты и отшлифованы так тонко, что жюри знаменитой Сорбонны, в состав которого входили такие корифеи французской науки, как Поль Ланжевен и Жан Перрен, без колебаний оценило ее «как бриллиант первой величины».

Математические рецепты

Через год двадцатипятилетний геттингенец Вернер Гейзенберг опубликовал свою знаменитую матричную механику. Она была удивительным порождением интуиции одного ученого и в известном смысле освобождала других от необходимости... думать. Основной труд уходил на освоение непривычных математических методов. Дальше все шло удивительно просто. Нужно было записать условия очередной задачи в символической матричной форме (для этого, конечно, нужно поломать голову). Но дальше можно действовать по раз навсегда разработанным правилам. В конце этой почти механической

работы возникало решение. Разглядеть его среди леса формул всегда помогал опыт.

Молодой профессор из Цюриха Эрвин Шредингер весной 1926 года прорубил еще одну просеку в дремучем лесу микромира. Шредингер получил замечательное уравнение, известное теперь под названием волнового. Он показал, что в сложных случаях, когда в процессе участвует сразу много частиц, соответствующая волна, описывающая их движение, становится очень сложной. Она уже не помещается в пределах обычного трехмерного пространства. Для ее описания нужно вообразить пространство со многими измерениями!

Теперь в физику микромира прочно вошло абстрактное многомерное пространство, дотоле бывшее многолетней вотчиной классической физики.

Так в результате вдохновенной работы де Бройля, Гейзенберга и Шредингера родилась новая квантовая механика — удивительное, не совсем понятное, заряженное математической взрывчаткой оружие для дальнейших походов в микромир.

В преодолении трудностей, возникавших на пути триединой теории, включались все новые силы. Но главное направление здесь вело не к лазерам, а к атомной бомбе и атомной электростанции. Поэтому мы оставим этот путь и вернемся назад, чтобы проследить за развитием других идей, имеющих непосредственное отношение к нашей теме.

Шаг назад, скачок вперед

Отступим к началу нашего века, когда в науку входил юноша из Одессы Леонид Мандельштам.

В эти столь бурные годы Мандельштама привлекли работы Планка, стремившегося понять, почему свет, проходящий через прозрачную, незамутненную среду, ослабляется. Причиной могло быть только рассеяние. Но что может рассеивать свет в чистом, однородном газе?

И как быть с опытами, безупречными опытами, с удивительной точностью подтверждавшими ранее господствующую теорию рассеяния? Все в ней представлялось бесспорным и как бы протестовало против вмешательства.

Мандельштама не смутило совпадение результатов опытов с прежней теорией. Об одном из таких опытов он написал в 1907 году: «Это совпадение должно рассматриваться как случайное».

Целым рядом работ Мандельштам показал, что беспорядочное движение молекул не делает газ однородным. В реальном газе всегда имеются мельчайшие разрежения и уплотнения, образующиеся в результате хаотического теплового движения. Вот они-то и приводят к рассеянию света, так как нарушают оптическую однородность воздуха.

Мандельштам писал: «Если среда оптически неоднородна, то, вообще говоря, падающий свет будет рассеиваться и в стороны».

Много позже, в 1917 году, Мандельштам и независимо от него французский ученый Леон Бриллюэн задались вопросом о том, как же происходит рассеяние света в прозрачных однородных жидкостях и твердых телах, плотность которых неизмеримо больше плотности воздуха.

Оказалось, что и здесь большую роль играют флуктуации плотности, подчиняющиеся законам, родственными тем, которые приводят к движению броуновские частицы.

Но в жидкостях и твердых телах, которые физики объединяют обобщающим понятием — конденсированные среды, в процесс рассеяния света вмешивается новый фактор, корни которого простираются до 1820 года, когда французы Дюлонг и Пти установили замечательный факт равенства удельной теплоемкости всех твердых тел. Попытки объяснить эту закономерность дали толчок многим далеко идущим исследованиям. Но причина столь удивительного равенства так и осталась неясной, и опытный факт со временем превратился в закон Дюлонга и Пти. Лишь более чем через половину века цюрихский профессор Вебер обнаружил, что удельные теплоемкости алмаза, графита, бора и кремния резко отклоняются

в меньшую сторону от закона Дюлонга и Пти. Он же установил, что повышение температуры уменьшает обнаруженное им отклонение.

Эйнштейн, в студенческие годы слушавший лекции Вебера, не мог остаться равнодушным к его открытию. Он представил себе атомы твердых тел колеблющимися вокруг устойчивых положений равновесия, определяемых взаимодействием их электрических полей. Свойства таких атомных систем напоминают в общих чертах поведение системы грузиков, связанных пружинками. Эйнштейн стремился во всех случаях описать сложную систему при помощи наиболее простых моделей и наиболее простых формул, лишь бы они воспроизводили существенные черты реальных явлений. Этот путь и здесь привел его к успеху. Применяя к своей модели формулы Планка, он смог объяснить наблюдения Вебера.

Впоследствии Дебай развил работу Эйнштейна и показал, что тепловые колебания твердых тел имеют ту же природу, что и звуковые колебания, но частоты их занимают несравненно больший диапазон, чем слышит наше ухо. То были ультразвуковые и гиперзвуковые колебания, много позже освоенные техникой. Но звуковые волны связаны с сжатием и разрежением, с изменением плотности вещества. Если эти волны порождаются тепловыми движениями, то их наложение приводит к хаотическим изменениям, к флуктуациям, плотности. Достаточно было осознать это, и механизм рассеяния света в конденсированных средах становился ясным. Теперь этот процесс известен как рассеяние Мандельштама — Бриллюэна. Он приобрел новое значение после создания лазеров.

Многообещающая находка

Много лет спустя, в 1925 году, став заведующим кафедрой Московского университета, Мандельштам продолжил исследования рассеяния света совместно с искусным экспериментатором Григорием Самуиловичем Ландсбергом.

Результаты совместной работы были неожиданны и необычайны. Ученые обнаружили совсем не то, что ожидали, не то, что было предсказано теорией. Они открыли совершенно новое явление. Но какое? И не ошибка ли это? В рассеянном свете появилась целая комбинация частот, которых не было в падающем на вещество свете.

На фотографиях спектра рассеянного света упорно появлялись слабые и тем не менее вполне явные линии, свидетельствующие о наличии в рассеянном свете «лишних» частот. Многие месяцы ученые искали объяснение этому явлению. Откуда в рассеянном свете появились «чужие» частоты?

И настал день, когда Мандельштам осенила изумительная догадка. Это было удивительное открытие, то самое, которое и теперь считается одним из важнейших открытий XX века.

Глубокая интуиция и ясный аналитический ум Мандельштама подсказали ученому, что обнаруженные изменения частоты рассеянного света не могут быть вызваны теми межмолекулярными силами, которые выравнивают случайные неоднородности плотности воздуха или вызывают ультразвуковые — дебаевские — волны в твердых телах. Ученому стало ясно: причина, несомненно, кроется внутри самих молекул вещества, и явление вызвано внутримолекулярными колебаниями атомов, образующих молекулу. Такие колебания происходят с гораздо более высокой частотой, чем те, что сопровождают образование и рассасывание случайных неоднородностей среды. Вот эти-то колебания атомов в молекулах и сказываются на рассеянном свете. Атомы как бы метят его, оставляют на нем свои следы, зашифровывают дополнительными частотами.

Таким образом, для объяснения нового явления, которое получило название «комбинационное рассеяние света», достаточно было теорию молекулярного рассеяния, созданную Мандельштамом, дополнить данными о влиянии колебаний атомов внутри молекул.

Впоследствии из этого открытия была извлечена огромнейшая польза, оно получило ценное практическое применение.

В наши дни комбинационное рассеяние стало основой одного из типов лазеров.

Намек

Мы уже знаем, как Эйнштейн сделал первый шаг к лазерам. Но в то время никто не понял, куда ведет тропинка, на которую он ступил. Не понял этого и он сам. Его интересовало другое. Он стремился лишь к тому, чтобы устранить назревшее противоречие между оптикой и термодинамикой.

Оптикам и до Эйнштейна было известно, что самопроизвольное излучение атомов не зависит от внешних условий, а определяется только свойствами атомов. Напротив, поглощение растет вместе с интенсивностью падающего света.

Это был чисто теоретический вывод. Вынужденное излучение не поддавалось наблюдению: его маскировало более сильное поглощение.

Советский физик Валентин Александрович Фабрикант обратил внимание на то, что вынужденное излучение ненаблюдаемо только потому, что в обычных условиях этому препятствует закон Больцмана. В соответствии с ним атомы предпочитают находиться в состояниях с малой энергией, подобно тому, как молекулы воздуха скапливаются в нижних слоях атмосферы. Внизу воздух плотнее, с высотой он становится все более разреженным.

Так и атомы. В состояниях с малой энергией их много, в верхних состояниях меньше. А так как, по теории Эйнштейна, внешнее электромагнитное поле с равной вероятностью побуждает единичный атом поглотить фотон и повысить свою энергию или испустить фотон и избавиться от избыточной энергии, то результат определяется законом Больцмана: в обычных условиях число атомов, способных к поглощению, преобладает.

Значит, сказал Фабрикант, нужно создать необычные условия, в которых закон Больцмана уже не властен. Для этого необходимо нарушить тепловое равновесие среды, и нарушить так сильно, чтобы атомов с большой энергией стало больше, чем атомов с малой. Тогда такая среда вместо поглощения света будет усиливать его...

Шли годы. Началась вторая мировая война. Гитлеровцы предательски напали на нашу Родину. Народ бросил все силы на борьбу с врагом. Вместе со всеми, конечно, были и ученые.

Но вот пришла долгожданная победа. Люди возвращались к мирному труду. Вся страна, каждый человек занялись неотложными делами. Только через пять лет Фабрикант смог вспомнить о своей давнишней работе. В те годы каждый думал прежде всего о непосредственной пользе. И Фабрикант, конечно, увидел, что и его докторская диссертация может найти техническое применение. Он вместе с несколькими сотрудниками принялся за работу. Ее итог — заявка на изобретение способа усиления электромагнитных волн при помощи вынужденного излучения. Дата приоритета — 1951 год. В заявке указывалось несколько путей достижения желаемого результата в газовых средах. Однако, несмотря на все усилия, авторы не смогли реализовать ни одного из них.

К сожалению, публикация заявки затянулась до 1959 года, так что приоритет авторов приобрел в значительной мере формальный характер, а она практически не оказала влияния на последующие работы других ученых.

В том же 1951 году известный физик Пэрселл и молодой радиофизик Паунд сумели на короткий срок столь сильно нарушить тепловое равновесие вещества, что оно стало активным — вынужденное испускание в нем превосходило поглощение электромагнитных волн. Правда, то были не световые, а радиоволны, но от этого опыт не становился менее важным. Опыт был очень простым. Физики помещали кристалл фтористого лития в поле сильного магнита. Кристалл намагничивался. Большинство ядер атомов лития и фтора, являющихся подобием маленьких магнетиков, поворачивалось вдоль поля магнита так,

чтобы их энергия в поле была минимальной. Затем кристалл нужно быстро вынуть из поля, перевернуть так, чтобы та его сторона, которая была обращена к северному полюсу магнита, обратилась к южному, и всунуть кристалл обратно. Теперь большинство ядер-магнетиков направлено против поля. Их энергия в поле максимальна. Они стремятся избавиться от избыточной энергии, излучая радиоволны. Они излучают спонтанно — самопроизвольно. Но Пэрселл и Паунд не догадались, что стоит направить на кристалл внешнюю радиоволну — и она будет усилена. Пэрселл и Паунд стояли на пороге открытия, но не сделали решающего шага.

Форварды

Для того чтобы понять, почему глубокие идеи Эйнштейна и Дирака, конкретные предложения Фабриканта и замечательный опыт Пэрселла и Паунда не привели непосредственно ни к созданию лазеров, ни даже к возникновению квантовой электроники, нужно на время отвлечься от судьбы исследований света.

В 1939 году в Физическом институте Академии наук СССР, который помещался в то время на Третьей Миусской улице Москвы, появился выпускник Ленинградского университета Саша Прохоров. Он хотел заниматься радиофизикой и включился в исследования распространения радиоволн, которые проводились под руководством ученых-друзей — Леонида Исааковича Мандельштама и Николая Дмитриевича Папалекси.

В лаборатории колебаний все были проникнуты стремлением к познанию основных закономерностей, объединяющих между собой разнообразные явления. Главным руководством служила общая теория колебаний, которая в то время находилась в стадии построения своей наиболее сложной — нелинейной части. Эта теория позволяла с единой точки зрения изучать работу лампового генератора радиоволн и работу человеческого сердца, распространение радиоволн и распространение звука, таинственный люксембургско-горьковский эффект и прохождение света через кристаллы. Всего не перечесать.

Здесь учили пользоваться безмерной мощью математики, но старались по возможности привлекать наиболее простые и наглядные методы. Через оптические явления перебрасывались мосты в мир атомов, в лишь недавно освоенную квантовую область. Отсюда проходили пути к предельным скоростям, в мир теории относительности. И главное, тут учили замыкать связь между идеей и ее техническим воплощением. Словом, Прохоров попал в одну из самых передовых школ современной физики, и он пришелся здесь ко двору. Теория перемежалась с экспериментом, лабораторная работа сочеталась с экспедициями. Белое море, Кавказ, Рыбинское море.

Но пробыл он в лаборатории недолго. Грянула война, и ему пришлось сменить романтику научного поиска на будни армейской разведки. После войны из-за последствий тяжелого ранения он долго не мог участвовать в полевых экспериментальных исследованиях. Пришлось работать только в лаборатории, изменить научную тематику. Но и в этих условиях он продолжал вносить свой вклад в общее дело, работал над повышением точности радиолокационных и радионавигационных систем.

Он стал аспирантом профессора Сергея Михайловича Рытова, ныне члена-корреспондента АН СССР, глубокого и интересного ученого, и через три года трудных теоретических и экспериментальных исследований защитил кандидатскую диссертацию.

В это время в лаборатории появился студент-практикант Николай Басов. Война оставила свой мрачный след и в его жизни. Призванный в армию, он был послан в Военно-медицинскую академию. Не успев кончить академию, попал на фронт. После победы участвовал в демонтаже заводов, на которых гитлеровцы изготавливали отравляющие вещества, перенес сильное отравление, долго болел.

После демобилизации Басов выбрал Московский инженерно-физический институт. Физика казалась ему неотделимой от техники. Он правильно понял дух нашего века.

Постепенно его начала все сильнее привлекать к себе теоретическая физика, ее покоряющая мощь, ее гигантские успехи, ее захватывающие тайны. Может быть, это произошло потому, что кафедрой теоретической физики в институте руководил академик Игорь Евгеньевич Тамм, блестящий представитель школы Мандельштама. Басов стал одним из лучших студентов кафедры. Но, попав на практику в Физический институт, в лабораторию к Прохорову, на чисто экспериментальную работу, он включился в нее со всей присущей ему энергией и вскоре на год раньше установленного срока защитил дипломный проект. Здесь экспериментальным исследованиям было уделено не меньше места, чем теоретическим.

Басов вместе с Прохоровым увлекся радиоспектроскопией. Одно из исследований в этой области стало темой его кандидатской диссертации.

Дружная работа молодых радиофизиков, одинаково хорошо владеющих искусством тонкого эксперимента и методами современной теории, обладающих исключительной интуицией и чувством нового, привела их к переломному пункту их научной судьбы — к созданию молекулярного генератора радиоволн, к открытию фундаментальных принципов, ставших основой новой области науки, которую они назвали квантовой радиофизикой.

Примерно в то же время далеко за океаном, в Колумбийском университете города Нью-Йорка, почти тем же путем входил в науку молодой физик Чарлз Таунс. Колумбийский университет, основанный в 1754 году, превратился в крупный научный центр еще до того, как разгул фашизма в Италии и Германии, а затем захват гитлеровцами стран Центральной и Западной Европы вызвали массовую эмиграцию ученых. Впрочем, даже в двадцатые годы нашего века Колумбийский университет был единственным местом в многомиллионном городе, где можно было заниматься физикой.

К началу второй мировой войны здесь сформировался первоклассный центр по исследованию атомных пучков. Основатель его — Исидор Раби — взял старт в Европе, в лаборатории Штерна, патриарха подобных исследований. Но Раби сделал существенный шаг вперед — он сочетал технику атомных пучков с радиотехникой. Так, по существу, родилась радиоспектроскопия.

Радио объединилось с атомами и молекулами. Появилась возможность чрезвычайно точно исследовать многие свойства атомных ядер, но это еще не привело к возникновению новой области науки.

Радиоспектроскопия родилась вторично и начала бурно развиваться после второй мировой войны, когда физикам стала доступна техника сантиметровых радиоволн, созданная в ходе развития радиолокации.

Ранние публикации Таунса в области радиоспектроскопии относятся к 1946 году. Первая содержала несколько строчек. То была лишь аннотация, по английской терминологии «абстракт», об исследовании молекулы аммиака. Вторая составила уже примерно страничку, содержащую письмо в редакцию журнала «Физические обозрения» об исследовании молекулы воды. Работы не произвели особого впечатления. В то время исследования аммиака и воды уже велись широким фронтом во многих лабораториях, пожалуй, на более высоком уровне.

За первым шагом последовал быстрый разбег — в следующем году два письма и три абстракта, уже с новыми интересными результатами, а еще через год Таунс стал одним из ведущих специалистов в области радиоспектроскопии газов.

Первенец

Многие переломные даты представляются крайне условными. Это относится не только к началу нашей эры, но и к началу века пара, века электричества... Лишь в начале атомного века стоит страшная зарубка взрыва, всколыхнувшего пустыню штата Нью-Мексико.

Рождение квантовой радиофизики относится к 1954 году, когда Басов и Прохоров в Физическом институте имени П.Н. Лебедева в Москве и Таунс вместе с Гордоном и

Цайгером в Колумбийском университете в Нью-Йорке практически одновременно и совершенно независимо добились генерации радиоволн при помощи молекул. Это был прибор нового типа. Молекулярный генератор — назвали его в Москве, мазер — окрестили его в Нью-Йорке. Слово «мазер» образовалось из первых букв английской фразы, описывающей принцип, лежащий в основе работы прибора («усиление радиоволн при помощи вынужденного испускания» — «Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation»).

Но поскольку молекулярный генератор был действующим прибором, его появление означало рождение близнецов. Вместе с квантовой радиофизикой возникла квантовая электроника — так впоследствии назвали техническое направление новой науки.

Атомы, комбинируясь в различных сочетаниях, образуют все многообразие мира. Даже если атомы однотипны, они могут группироваться по-разному. Так, углерод может предстать невзрачным коксом, блестящим черным графитом и ослепительным алмазом. Все зависит от условий, созданных природой или человеком. Так, будничная окись хрома, попав в бесцветный корунд, превращает его в прекрасный рубин, а войдя в столь же бесцветный берилл, порождает изумруд, считающийся более драгоценным камнем, чем бриллиант.

В молекулярном генераторе объединились и выкристаллизовались идеи и методы многих замечательных людей. Вобрав их в себя, он подвел итоги целой эпохи и открыл перед человечеством новые перспективы.

Советский и американский варианты молекулярных генераторов — настоящие близнецы. Генетически они тождественны. Но, развиваясь в различных условиях, приобрели некоторые внешние различия. Совсем как у людей. Так, цвет лица близнецов может быть смуглым и бледным в зависимости от климата, а фигура измениться в соответствии с кулинарными пристрастиями супруги.

Сердцем обоих приборов является объемный резонатор. В нем под влиянием его электромагнитного поля происходят акты вынужденного испускания молекул. Он осуществляет обратную связь, связь между молекулами, уже успевшими излучить, и теми, которым это только предстоит. Он обеспечивает высокую упорядоченность такого коллективного излучения. Упорядоченность, несвойственную ранее излучению молекул и атомов, но являвшуюся отличительной особенностью радиоволн. Итак, сердце в обоих приборах исполняет одинаковую функцию и действует в соответствии с едиными законами. Здесь сочетаются вынужденное испускание и обратная связь. Несколько различаются лишь размеры резонаторов, но это почти не сказывается на работе прибора.

И в Москве, и в Нью-Йорке рабочим веществом был аммиак — газ, ставший пробным камнем радиоспектроскопии. Его молекулы обладают самыми интенсивными спектральными линиями в диапазоне сантиметровых волн, наиболее удобном для проведения экспериментов. Свойства молекулы хорошо изучены и позволяют просто совершить важнейший шаг, без которого молекулярный генератор остался бы грудой металла. Речь идет о нарушении теплового равновесия, нарушении столь сильном, что в результате молекул, находящихся на более высоком энергетическом уровне, становится больше, чем оставшихся на нижнем уровне. Если это достигнуто, совокупность молекул, попав в поле резонатора, будет излучать радиоволны, усиливая поле. Если же равновесие нарушено недостаточно сильно или не нарушено совсем, то в совокупности молекул будут преобладать находящиеся внизу, что приведет к обычному поглощению энергии радиоволн.

Но продолжим сравнение наших близнецов. Все их существенные детали расположены внутри металлических кожухов. Конечно, форма кожухов различна, но назначение одинаково. Внутри должен быть обеспечен вакуум. Доступ воздуха недопустим. Вакуум обеспечивается специальными насосами. Насосы поступили с различных заводов, но и они близнецы. Они способны в должной мере откачать из прибора воздух, но не могут справиться с массой аммиака, которая, по расчетам, должна поступать в приборы во время их работы. И в Физическом институте, и в Колумбийском университете на помощь насосам призван жидкий азот. Он охлаждает специальные металлические поверхности до

температуры 77 градусов по шкале Кельвина, и аммиак намерзает на них, постепенно образуя слой, похожий на иней. Его можно видеть через смотровые окна, имеющиеся в приборах. Аммиак поступает в приборы из баллонов. Сперва он попадает в цилиндр, одна из стенок которого сделана из металлической фольги со множеством мельчайших отверстий. Через отверстия в вакуум вылетает пучок молекул аммиака. Молекулярный пучок. Здесь нет игры в слова. Молекулярный пучок, по терминологии физиков, — это пучок молекул, вылетающих в вакуум таким образом, что они летят почти параллельно друг другу и практически не сталкиваясь между собой. Таких условий можно добиться, подбирая размеры отверстий в фольге и давление газа перед нею в соответствии с правилами, определяемыми свойствами газов.

Важнейшей деталью молекулярного генератора является квадрупольный конденсатор — конденсатор, образованный четырьмя стерженьками специальной формы, присоединенными через один к положительному и отрицательному полюсам высоковольтного выпрямителя. Конденсатор установлен между источником молекулярного пучка и входным отверстием резонатора. Поле конденсатора действует на молекулы аммиака так, что те из них, которые находятся в нижних энергетических состояниях, отбрасываются в стороны, а находящиеся в высших энергетических состояниях направляются в резонатор. Таким образом, в резонатор попадает пучок молекул, подавляющее большинство которых обладает избытком внутренней энергии. Физики называют такой пучок инвертированным. Под действием поля резонатора молекулы пучка отдают полю избыток своей внутренней энергии. Так молекулы генерируют радиоволны.

Логика науки держала физиков в жестких рамках. Именно поэтому обе группы шли столь схожими путями, как если бы они постоянно обменивались мыслями, обсуждали свои планы, достижения и неудачи. Может ли быть более убедительный пример единства научного процесса!

Басов, Прохоров и Таунс много потрудились над исследованием и усовершенствованием молекулярного генератора. Но это был лишь первый шаг в новом направлении. Узенькая тропинка в неведомое быстро расширялась, переходя в широкую дорогу, от которой ответвлялось все больше новых путей. И по-прежнему перед первопроходцами возникали острые камни и пропасти, а за ними оставалась гладкая дорога. И если оглянуться далеко назад, видно, как там, вдали, она уже покрыта асфальтом и по ней мчатся машины, а вдоль тротуаров счастливые родители катят в колясках своих малышей.

Изберем же ту из дорог, которая приведет к лазеру.

Красная молния

В середине сентября 1959 года вблизи Нью-Йорка, в тихом местечке Хай Вью, собралась разноязычная компания ученых. Это были участники первой международной конференции по квантовой электронике. По сравнению с масштабами других международных конференций их было так мало, что организаторы смогли поместить в томе трудов конференции список всех ее участников. Здесь наряду с Басовым, Прохоровым и Таунсом можно найти имена многих знаменитых современных физиков.

Конференция как в зеркале отразила основные направления оптической науки. Большинство докладов и кулуарных бесед касались молекулярных генераторов, атомных часов, парамагнитных усилителей, их исследования и применений. Это было естественно. Но главным в ней было не это. Здесь прозвучали фанфары, возвещавшие вторжение радиофизиков в исконную вотчину оптиков.

После конференции многие лаборатории взялись за новую тематику. Радиофизики подходили к оптическим задачам со своих позиций. Результаты появились быстро.

В начале 1960 года в лондонском журнале «Природа» появилось коротенькое сообщение Т. Меймана о том, что он создал новый генератор световых волн. Принципиально

новый.

В лабораторию к Мейману началось паломничество. Там стоял ничем с виду не примечательный прибор. Но посетители не сводили глаз с маленького ящика, на верхней крышке которого лежал металлический цилиндр размером с литровую консервную банку. В середине его торца виднелось небольшое отверстие.

После кратких пояснений Мейман нажимал кнопку, вмонтированную в корпус прибора. В середине листа, прикрепленного к стене лаборатории, на мгновение ослепительно вспыхивало небольшое ярко-красное пятно.

Но те, кто смотрел не на стену, а на прибор, видели, как из отверстия в его торце вылетал луч толщиной не больше карандаша. Почти не расширяясь, этот луч упирался в стену, оканчиваясь ослепительным круглым пятнышком. В комнате было совсем светло, но красный луч выглядел примерно так же, как луч солнца, проходящий в затемненную комнату через отверстие шторы.

После нескольких вспышек металлический цилиндр обычно открывали. Но в нем не было ничего необычного. Разве лишь два тривиальных предмета. Спиральная лампа-вспышка, похожая на те, которыми пользуются фотографы, и бледно-розовый прозрачный кристалл размером с обычную сигарету. Концы его блестели как зеркало. Они действительно были покрыты зеркальным слоем серебра.

Мейман рассказывал коллегам, что розовый стерженек сделан из искусственного рубина. Такой же рубин, но еще более светлый, применяется в мазерах для усиления радиоволн.

В поглощении света участвует не весь материал, образующий кристалл, а только ионы хрома, которых здесь лишь доли процента. Но именно они играют главную роль в работе прибора. Свойства рубина подробно изучены при разработке мазеров. Облучая его радиоволной, можно заставить ионы хрома усиливать радиоволны.

Мейман первый догадался, что, облучая рубин светом лампы-вспышки, можно заставить его усиливать свет. Опыт работы с мазерами и статьи Таунса (а может быть, он читал и статьи Прохорова и Басова) говорили о том, что, применив обратную связь, можно превратить усилитель в генератор, в генератор света, действующий совершенно так же, как обычный радиопередатчик. Какой резонатор можно применить при работе со светом, тоже было известно — пару параллельных зеркал. Проще всего отполировать торцы рубинового стержня и прямо на них нанести зеркальный слой серебра.

Новый прибор оказался настолько похожим на мазер, что Мейман и в названии заменил лишь одну букву, превратив мазер в лазер. Он сказал: «Это потому, что принцип действия обоих приборов одинаков. Различаются только диапазоны длин волн, в которых они работают. Буква «л» — сокращение слова «лайт» (свет). Остальные буквы означают «усиление при помощи вынужденного испускания».

В приборе Меймана источниками света, как и в мазере, были миллиарды миллиардов электронов, входящих в состав ионов хрома, рассеянных в толще рубинового стержня. И все эти электроны испускали свет не независимо, не хаотически, не самопроизвольно. Они испускали его более согласованно, чем звучат скрипки в хорошем оркестре.

Такое совпадение основных характеристик световых волн оптики называют когерентностью. Почти все умопомрачительные достижения лазеров так или иначе связаны с когерентностью. С тем, что вынужденное излучение отдельных частиц в результате обратной связи оказывается жестко связанным и вся масса активного вещества генерирует как одно целое.

До появления прибора Меймана оптики почти всегда имели дело с некогерентным светом. Прибор Меймана впервые показал, что и в оптике слаженный коллектив приобретает качества и возможности, недоступные хаотическому сборищу индивидуальностей.

Физики уже имели дело с вынужденным испусканием электромагнитных волн в сантиметровом диапазоне радиоволн. Там оно привело к недостижимой ранее стабильности генераторов, к предельной чувствительности приемников.

Теперь им было ясно, что вынужденное испускание в оптике дает гораздо больше, чем простое усиление света, о котором писал Фабрикант в своей диссертации. Вынужденное испускание в оптике открывает путь для небывалой концентрации энергии, для передачи энергии на огромные расстояния с очень малыми потерями, для создания новых систем связи... Впрочем, могли открыться возможности, о которых никто еще и не мечтал.

Глава III. Гигантский импульс

Крупица солнца

Обезьяна, сбросив кокосовый орех с вершины пальмы спешит вниз, чтобы насытиться мякотью плода. Она постигла элементарную связь между причиной и следствием, между целью и способом ее достижения. Она знает, что не способна ни раздавить, ни разгрызть этот орех. Она научилась использовать в своих целях силу тяжести.

Человек не сильнее высших обезьян. Но умнее. Он начал применять, а затем и изготавливать орудия. Положив кокосовый орех на большой камень, он раскалывает его другим камнем. Обезьяна не может постичь того, что удар камнем по ореху заменяет падение ореха на камень. Человек же понял, что простой нажим даже тяжелого камня не даст того, к чему приводит резкий удар более легким.

Как много веков должно было пройти, прежде чем подобные простые соображения привели к механике Аристотеля, а затем к принципу относительности! Сколь разнообразны последствия первых ударов камней по орехам и палиц по черепам диких зверей! Молот древнего кузнеца выполнял ту же функцию, которой служит молот в любой современной кузнице. Плавным взмахом молотобоец передает энергию своих мышц молоту, поднимая его и со все возрастающей скоростью обрушивая на заготовку. Огромный импульс, скопленный молотом во время взмаха, в мгновение ока деформирует заготовку, раз за разом превращая ее из грубой болванки в лемех плуга или ось повозки. Самые совершенные пневматические и электрические молоты выполняют ту же задачу — скопить в себе энергию сравнительно маломощного источника и выплеснуть ее в нужный момент в виде сокрушающего импульса.

Каждый раз, когда человек овладевал новым видом энергии, он стремился найти возможность запастись ее и потом мгновенно высвободить. Так было и с электричеством. Еще в 1745 году некто Мушенброк в голландском городе Лейдене соорудил сосуд, способный запастись электричеством, и поражал соседей яркими громохочущими разрядами. Тогда всем казалось, что молния покорена и скоро будет служить людям.

Но и в наши дни, когда электрические искры обрабатывают твердые сплавы, незримо трудятся в автомобильных двигателях, молния остается лишь грозным и опасным явлением природы, а лейденские банки можно увидеть только в школьных кабинетах физики. На смену им пришли разнообразные конденсаторы, без которых немислим ни радиоприемник, ни телевизор, ни современный маяк, ни лампа-вспышка, помощница фотографа. Электрическая энергия, запасенная в виде заряда конденсатора, может высвободиться за очень короткие промежутки времени, порождая яркие сполохи сигнальных ламп современных самолетов.

Импульсные лампы, наполненные инертным газом ксеноном, батареи конденсаторов, накапливающих электрическую энергию для питания этих ламп, являются сейчас необходимыми элементами большинства лазеров, использующих кристаллы, стекла и жидкости в качестве активного материала, способного генерировать вспышки когерентного света.

Именно лазеры позволили ученым достичь наибольшей концентрации энергии. Энергия сосредоточивается в огромных по мощности пучках света, сжатого до размеров, не превышающих одного микрона. История борьбы за сверхвысокие мощности интересна не

только сама по себе, но и как прелюдия к не менее захватывающему будущему. Сверхмощные импульсы света в прямом и переносном смысле освещают один из многообещающих путей к покорению энергии термоядерного синтеза. Возможно, именно так человечество овладеет неисчерпаемыми источниками ядерной энергии, сохранив уголь и нефть, торф и древесину от уничтожения в топках.

Физики знают: для того чтобы два ядра тяжелого водорода — дейтерия могли слиться друг с другом, образуя ядро гелия и высвобождая порцию энергии, они должны столкнуться между собой с огромными скоростями. Только при этом могут быть преодолены силы взаимного отталкивания одноименных зарядов ядер. Силы, защищающие ядро от ему подобных, крепче лат средневековых рыцарей. Чтобы придать ядрам дейтерия нужную скорость, следует нагреть их до температуры в несколько десятков миллионов градусов. Но одного этого недостаточно. Ведь ядра нельзя точно направить одно на другое, с тем чтобы они обязательно столкнулись между собой. Столкновение — дело случая. И чтобы такие случаи реализовались в достаточном количестве, нужно на некоторое время удержать раскаленный газ в ограниченном объеме, несмотря на огромные скорости, заставляющие его рассеиваться в пространстве.

Итак, нагреть и удержать. Но как нагреть и как удержать? Первый обнадеживающий путь указал академик И.Е. Тамм: нагреть электрическим разрядом и удержать силой магнитных полей. Этот путь привлек многих ученых. Но никто еще не прошел его до конца. Никто не достиг вожделенной цели.

Главная причина в том, что при помощи электрического разряда невозможно осуществить достаточно быстрый нагрев. И даже сегодня мощная магнитная ловушка не способна удержать от расширения плазму, когда ее температура превышает миллион градусов... Соревнование между природными свойствами атомов и ухищрениями людей кончается не в пользу последних. Тепловое движение, стремящееся разметать атомы, пока что берет верх над удерживающими силами ловушки и способностью мощного электрического разряда продолжать нагрев разлетающейся плазмы.

Ни ускорить до нужной величины процесс нагрева, ни увеличить время удержания плазмы пока не удастся, хотя опыт советских ученых под руководством академиков Л.А. Арцимовича и М.А. Леонтовича на установках типа «Токамак» привел их на самый порог поставленной цели.

А вот другой путь. В вакуумную камеру выстреливается льдинка замороженного дейтерия. Мощная вспышка лазера встречает льдинку в центре камеры. Мощность лазерного луча столь высока, что льдинка, температура которой первоначально близка к абсолютному нулю, мгновенно превращается в крупинку Солнца. Температура ее приближается к бушующей в недрах звезды, а плотность все еще очень велика. Ведь за то мгновение, пока длится вспышка, частицы, уже набрав колоссальную скорость, еще не успели заметно сместиться в пространстве.

В этой адской температуре порваны связи между ядрами и электронами. Атомов дейтерия уже нет. Пылает плазма из ядер дейтерия — дейтонов и свободных электронов. Сталкиваясь между собой, дейтоны образуют ядра гелия. Температура при этом еще больше нарастает. Сопутствующие реакции порождают свободные нейтроны. Еще несколько мгновений — и рукотворная звездочка гаснет. Плазма, быстро остывая, разлетается по вакуумной камере.

А ученые еще долгими часами вглядываются в записи приборов. Долгими месяцами думают над тем, как подготовить очередной опыт, следующий шаг к покорению энергии атомных ядер.

И каждый из таких филигранных опытов требует одновременного применения наиболее выдающихся достижений современной науки — криогенной техники, высокого вакуума, сверхмощных лазеров — и автоматики, не менее сложной, чем та, которая направляет зенитный снаряд в сверхзвуковой самолет.

О каждой из этих областей можно написать целую книгу, но наша книга о лазерах.

Поэтому здесь речь пойдет о том, как появились, и как работают лазеры, способные зажечь рукотворную звезду. Лазеры, дающие гигантские по мощности импульсы света.

Был бы факт

Первый лазер, подобно первому паровозу, был весьма несовершенным. Он перерабатывал в свет примерно пять сотых процента энергии, запасенной в конденсаторах, питавших лампу-вспышку. Это была, конечно, ничтожная мощность. И все же уже излучение первых лазеров обладало замечательными свойствами. В отличие от света обычных ламп, уходящего во все стороны, оно образовывало узкий слабо расходящийся луч. Диаметр луча при выходе из лазера составлял примерно сантиметр и увеличивался до двух сантиметров только на расстоянии в метр. Энергия вспышки составляла один джоуль. Примерно такую энергию излучает за одну секунду лампочка карманного фонаря мощностью в один ватт. Но лазер излучал эту энергию всего за тысячную долю секунды. Для того чтобы излучить один джоуль за тысячную долю секунды, необходима лампа мощностью в целый киловатт. Но обычная лампа не способна образовать узкий луч. Свести весь свет, излучаемый лампой, в луч, подобный лучу лазера, невозможно.

Уже через несколько лет, прошедших после появления первых лазеров, возможности новых приборов чрезвычайно возросли. Увеличение размеров и качества искусственных рубинов привело к увеличению энергии лазерной вспышки до сотен джоулей. Применение в лазерах специального стекла, содержащего ионы редкоземельного элемента неодима, дало еще более высокие энергии. Неодимовый лазер способен давать вспышки, энергия которых составляет многие килоджоули.

Такой рост энергии позволил применить лазеры для технологических целей в промышленности, для измерения расстояний в геодезии и астрономии, для лечения больных и, конечно, для различных исследовательских целей. Новые возможности, заманчивые цели требовали дальнейшего наращивания мощности лазеров.

Но увеличивать мощность лазерного излучения простым повышением энергии отдельных лазерных вспышек становилось все труднее и труднее. Промышленность практически достигла предела увеличения размеров рубиновых стержней. Изготавливать большие активные элементы из неодимового стекла значительно проще, но и здесь каждый следующий шаг требует колоссальных усилий и больших затрат.

Достигли практического предела и импульсные лампы, излучающие свет, возбуждающий активный материал лазера.

Оставалась возможность увеличить мощность лазерной вспышки, сокращая продолжительность лазерного импульса при той же энергии. Но для этого нужно увеличивать и мощность импульсных ламп накачки, чего, в свою очередь, тоже можно добиться, лишь сокращая длительность их вспышки. Однако такой путь оказался нереальным из-за быстрого разрушения ламп накачки.

Принципиально новый путь уже через год после появления первого лазера указал Р. Хеллворс. Его идея явилась результатом критического анализа процесса генерации лазера, активным веществом которого является кристалл или стекло, возбуждаемые светом ламп накачки. Оказывается, импульс света, излучаемого таким лазером, обычно имеет сложную структуру.

В большинстве случаев каждая вспышка лазера состоит не из монолитного импульса, а из множества отдельных вспышек, пичков, длительность которых составляет лишь миллионные доли секунды. Такие пички хаотически следуют один за другим с интервалами, равными обычно тоже миллионным долям секунды.

Почему же возникает такая сложная картина?

Этот вопрос не мог не волновать физиков, так как они понимали, что мощность лазера, таким образом, дробится на мелкие беспомощные порции.

Чтобы бороться с явлением, надо понять его. Что же происходит в кристалле или стекле при генерации? И физики снова мысленно оценивали каждую деталь лазера. Все знакомо, все тысячи раз ощупано...

В обычном состоянии активные ионы, обеспечивающие работу лазера, — ионы хрома в рубине или ионы неодима в стекле — находятся в основном энергетическом состоянии. Весь активный элемент пребывает в тепловом равновесии с окружающей средой.

А после начала вспышки импульсной лампы накачки? Активные ионы поглощают ее свет и постепенно во все возрастающем количестве переходят в возбужденное состояние.

Все это тоже было хорошо известно. Известно и то, что, как только число возбужденных ионов достигнет определенной величины, называемой порогом возбуждения, в лазере начнется генерация — лавинообразное возрастание числа фотонов. И генерация эта вызвана дружным переходом массы возбужденных ионов обратно в основное состояние. Как только вследствие испускания фотонов количество активных ионов станет недостаточным для поддержания генерации, генерация прекратится. Только под влиянием света ламп накачки может начаться новое увеличение числа активных ионов. Как только вновь будет достигнут порог генерации, возникнет излучение следующего пика и так далее — до угасания вспышки лампы накачки.

Долго ученые пытались форсировать режим ламп накачки. Но, увеличивая энергию ламп накачки, удавалось увеличить лишь количество отдельных пиков, но не мощность каждого из них.

Тогда, может быть, попытаться изменить сам процесс генерации?

Хеллворс решил попытаться достичь цели, добившись увеличения числа возбужденных ионов к моменту начала генерации, подняв порог возбуждения лазера. Он знал, что величина порога возбуждения зависит от многих причин, прежде всего от свойств активных ионов, длины активного элемента и отражающей способности зеркал. От тех же характеристик лазера зависит и мощность отдельного пика. Он понимал, что самый простой способ — уменьшить коэффициент отражения одного из зеркал. При этом действительно, прежде чем лазер начнет генерировать, в активном веществе должно накопиться большее число возбужденных ионов, чем в случае, когда оба зеркала отражают хорошо.

Но запастись большой энергией к началу генерации недостаточно для того, чтобы она полностью превратилась в излучение лазера. Малый коэффициент отражения выходного зеркала увеличивает не только порог, после которого начинается генерация, но и вызывает ее прекращение при большем запасе не высветившейся энергии. Итак, простой путь ведет в тупик.

Но Хеллворс нашел выход. Нужно, решил он, суметь быстро менять отражающую способность зеркала. Пусть она будет плохой до начала генерации и хорошей после того, как генерация началась. Можно заслонять зеркало не отражающим затвором и затем в нужный момент открывать его. Можно перед началом работы ламп накачки отклонять зеркало от правильного положения и возвращать в нужное положение лишь тогда, когда в активном веществе накопится достаточное количество возбужденных ионов.

Результаты первых же опытов превзошли все ожидания. Между выходным стержнем и зеркалом поставили затвор. Он открывался в тот момент, когда энергия, запасенная в активном веществе, достигала максимума. Неизвестно, ожидал ли Хеллворс увидеть то, что произошло в момент открытия затвора.

Не было ничего похожего на привычную работу лазера. Вся энергия, запасенная в активном стержне, выплеснулась в одном импульсе излучения. Хеллворс назвал его гигантским. Мощность излучения в импульсе превзошла десять миллионов ватт! Удивительной была и длительность импульса. Он продолжался лишь несколько стомиллионных долей секунды. И он был один. Хаотические пики не появлялись. В корне изменился весь процесс генерации.

Условия игры

Один из моих знакомых физиков в таких случаях говорит: «Был бы факт, а объяснение найдется».

Вот как объяснил своим коллегам возникновение гигантского импульса в лазере удачливый Хеллворс:

«Для генерации лазера необходимо одновременное наличие двух факторов — активное вещество должно быть возбуждено, а резонатор должен обеспечивать достаточно сильную обратную связь, чтобы при доступном уровне возбуждения был достигнут порог самовозбуждения. Радиоловитель увидит в этом много общего с условием самовозбуждения обычного лампового генератора. Возбужденный активный стержень, подобно радиолампе, поставляет в генератор энергию. Зеркала, образующие оптический резонатор, подобно катушке обратной связи, заставляют электромагнитные волны многократно циркулировать в системе, причем каждый замкнутый цикл сопровождается усилением, увеличением энергии волны.

В случае лазера, имея в виду энергию электромагнитной волны, удобнее говорить о числе фотонов, пролетающих через сечение активного стержня. Если условие самовозбуждения выполнено, то с каждым пролетом через стержень происходит лавинообразное увеличение числа фотонов. Очень важно, что скорость развития этой лавины не остается постоянной, а все возрастает по мере увеличения числа фотонов. Еще Эйнштейн определил это такими словами: вероятность испускания фотона под влиянием световой волны пропорциональна плотности энергии в этой волне. Но, пользуясь терминологией радиоинженеров, можно, говоря о качестве оптического резонатора, оценить его понятием добротности. Хороший резонатор имеет большую добротность, плохой резонатор — малую добротность. Если резонатор образован двумя хорошими зеркалами, его добротность велика. Закройте одно из зеркал, и резонатор перестанет существовать, его добротность упадет до нуля, обратная связь в лазере прекратится. Генерация не возникнет.

— Итак, — *развивал свою мысль Хеллворс*, — если лазер работает в обычном режиме, без управления добротностью, он генерирует серию хаотических пичков, совокупность которых образует лазерный импульс. Перед началом каждого пичка возбуждение активного вещества лишь немного превышает пороговое значение. Но и к концу этого пичка возбуждение активного вещества очень слабо опускается ниже порога. Продолжающееся действие ламп накачки создает условия для возникновения нового пичка. И так до тех пор, пока лампа накачки не истощит энергию, накопленную в конденсаторах.

В отличие от только что описанного режима свободной генерации в режиме управления добротностью активное вещество запасает в себе большую энергию. В момент включения полной добротности резонатора порог самовозбуждения оказывается превзойденным в несколько раз. При этом лавина самовозбуждения развивается так быстро и так интенсивно, что в одном-единственном импульсе высвечивается практически вся энергия, запасенная в веществе. Его возбуждение срабатывается не до порогового значения, а практически до нуля. Вещество разом освобождает всю энергию, запасенную им в процессе накачки. Вот и все. Я изложил вам условия игры. Игры в гигантский импульс».

Ученые многих стран включились в нее. После пионерской работы Хеллворса они начали совершенствовать методы генерации гигантских импульсов. Работа шла в двух направлениях: одно — совершенствование методов управления добротностью и второе — разработка материалов и конструкций, способных запасать большую энергию, поступающую от ламп накачки.

Было предложено и испытано множество различных методов управления добротностью. Жизнеспособными оказались три. Только они могли совместить

быстродействие, надежность и малую величину потерь энергии в самой системе управления.

Теперь уже трудно сказать, кто предложил наиболее простую и достаточно эффективную систему с вращающейся призмой. То была изящная и легко выполняемая конструкция. В ней стеклянная призма, две грани которой перпендикулярны и равны друг другу, заменяет собой одно из зеркал. Призма вращается при помощи маленького моторчика со скоростью нескольких десятков тысяч оборотов в минуту. Генерация возникает после включения ламп накачки в тот момент, когда передняя грань призмы в первый раз станет перпендикулярно оси резонатора. Обычно поджог ламп накачки осуществляется автоматически и связан с положением вращающейся призмы. Это обеспечивает достаточно хорошее воспроизведение условий генерации, а значит, увеличивает энергию гигантских импульсов.

Эта система сразу появилась во многих лабораториях и завоевала симпатии лазерщиков своей доступностью. Но скоро обнаружилось что-то вроде «врожденного порока». Скорость перехода от малой добротности резонатора к большой оказалась ограниченной. И ничего нельзя было поделать. Ведь призмы только постепенно занимают нужное положение. Не все сечение активного вещества одновременно охватывается процессом генерации. Казалось, можно уменьшить эти недостатки, увеличивая скорость вращения. Попробовали. Но скоро исчерпали все возможности. Порок был неустраним. Предел определяется прочностью материалов, неспособных противостоять огромным центробежным силам. Увы, пришлось прекратить поиски в этом направлении и усилить разработку других систем.

Вскоре на страницах научных журналов появились упоминания об электрическом затворе. Применившие его писали, что он свободен от недостатков системы вращающейся призмы. Он переходит из закрытого состояния в открытое под действием электрического импульса, поэтому переход совершается всего за стомиллионные доли секунды. Причем переключение происходит одновременно по всему сечению затвора. Авторы этого способа, однако, не скрывали, что недостатком затвора является неполное просветление. Даже в открытом состоянии потери в нем не падают до нуля. Вот почему пришлось искать следующий способ. Третий способ...

Роман вещества и энергии

Но будет ненужным отступлением от истины утверждать, что все лазерщики в ожидании дальнейших успехов на пути получения гигантского импульса сидели сложа руки. Конечно, нет. Многих вполне устраивали достигнутые мощности, и они с энтузиазмом пользовались ими в своих очередных научных исследованиях. Поэтому оставим на время тех физиков, которые ищут третий способ, и вернемся к ним, когда они его найдут. А пока поинтересуемся теми результатами, к которым привели два первых способа.

Создание лазеров, генерирующих гигантские импульсы излучения, дало гигантский импульс не только дальнейшему развитию лазерной техники, но послужило мощным толчком, открывшим неожиданные перспективы в других областях и приведшим к появлению новых научных направлений.

Одним из них явилась нелинейная оптика. Еще в долазерную эру замечательный оптик академик С.И. Вавилов предвидел, что под действием света большой интенсивности свойства вещества должны изменяться. При этом уравнения, описывающие распространение света, усложняются. Они становятся нелинейными. Отсюда и название нового раздела оптики. Но до создания лазеров не удавалось создать источники света, мощность которых позволила бы непосредственно провести соответствующие опыты. Тем не менее, глубокая физическая интуиция позволила Вавилову найти единственный путь, по которому экспериментатор мог войти в недоступную область нелинейной оптики. Этот путь был основан на использовании резонансных явлений.

Имеется множество примеров, когда слабая сила, действующая в резонанс, вызывает

постепенное нарастание колебаний, достигающих большой, иногда разрушительной интенсивности. Так, отряд солдат, проходя через один из петербургских мостов, разрушил его только потому, что, шагая в ногу, случайно попал в резонанс с собственными колебаниями моста.

Систематические исследования привели к успеху. Наблюдая поглощение света в области спектральных линий некоторых молекул, Вавилов и его сотрудники обнаружили, что величина поглощения уменьшается по мере увеличения интенсивности падающего света. Среда «просветлялась» в полном соответствии с предсказаниями. Кто мог ожидать, что отсюда впоследствии возникнет затвор для модуляции добротности лазеров, тот третий способ увеличения мощности импульса лазера, о котором мы только что условились пока не говорить?

Так мы и сделаем на время, пока не узнаем о том, что внес лазер в нелинейную оптику и оправдал ли он предсказания Вавилова.

В замечательной книге «Микроструктура света» Вавилов наряду с этим опытом рассматривает причины, по которым и другие характеристики вещества должны зависеть от интенсивности света. Он описывает, как должны протекать соответствующие явления, предвещая будущее развитие науки.

Наступил 1961 год, который можно считать началом современного этапа развития нелинейной оптики. Его открыли опыты П. Франкена и сотрудников, которые в середине 1961 года наблюдали, как при прохождении луча рубинового лазера через прозрачный кристалл возникло слабое фиолетовое свечение.

То был типичный нелинейный процесс — удвоение частоты колебаний. Конечно, этот опыт был воспринят как сенсация. Теперь, при наличии лазеров с управляемой добротностью, такой эксперимент доступен любой лаборатории и может послужить лабораторной работой для студента.

В Московском университете С.А. Ахманов и Р.В. Хохлов проанализировали опыты Франкена и, основываясь на глубоком понимании природы волновых процессов и нелинейной теории колебаний, установили, что надо сделать, чтобы умножение частоты в оптике стало столь же эффективным, как в радиодиапазоне. Они доказали, что нужно создать особые условия, при которых были бы равны скорости основной волны, возбуждаемой гигантским импульсом лазера, и волны удвоенной (или утроенной) частоты, возникающей в веществе. И они реализовали свои предсказания.

Они же создали новый тип лазера — параметрический генератор света, — который представляет собой, по существу, преобразователь частоты и перерабатывает гигантский импульс лазерного излучения в излучение, частота которого может по желанию экспериментатора принимать любое значение в широком диапазоне световых волн. Но этим не ограничились те новые истины, которые добыл лазер в области нелинейной оптики.

Нелинейная оптика тесно связана с явлением рассеяния света на акустических волнах — с так называемым рассеянием Мандельштама — Бриллюэна; с комбинационным рассеянием, открытым одновременно Мандельштамом и Ландсбергом в нашей стране и Раманом и Кришнаном в Индии. Гигантские импульсы света, излучаемые лазерами с управляемой добротностью, придали этим и некоторым родственным явлениям большое практическое значение. Например, вынужденное комбинационное рассеяние гигантского импульса света позволило создать лазер нового типа. Вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна в режиме гигантских импульсов должно, как указали Прохоров и его сотрудник Ф.В. Бункин, ограничивать возможности твердотельных лазеров, приводя к саморазрушению активного вещества.

Басов и Крохин, по-видимому, первые указали на возможность применения гигантских импульсов для лазерного нагрева плазмы как на путь к управляемым термоядерным реакциям. В Физическом институте имени П.Н. Лебедева и Басов и Прохоров со своими сотрудниками почти одновременно шагнули в область температур, превышающих миллион градусов, и наблюдали появление свободных нейтронов.

Однако оказалось недостаточно применить лазер с управляемой добротностью. Даваемый им гигантский импульс пришлось дополнительно усилить. Это была увлекательная работа. Она привела к удивительным результатам.

Здесь перечислены лишь некоторые последствия, связанные с применением гигантских импульсов лазерного света. Работа с ними столь перспективна, что она захватывает в свою орбиту все новые лаборатории, все новые коллективы.

Проникновение лазерного света в глубь вещества вскрывает такие сокровенные свойства материи, такие неизвестные до сих пор особенности самого света, что можно, пожалуй, сказать — начинается новая страница физики, новый роман вещества и энергии. Об этом мы еще расскажем. А сейчас время узнать, как идут дела с увеличением мощности гигантского импульса. Самое время, так как его ждут, как мы теперь знаем, интереснейшие задачи.

Третий способ

Представьте себе узкий стеклянный или кварцевый сосудик, между плоскими стенками которого налита жидкость — раствор одного из химических красителей. Выбранный краситель отличается тем, что, сильно поглощая излучение лазера, он мгновенно выцветает, становится прозрачным. Процесс, близкий к тому, от которого страдали модницы и изготовители дешевых тканей, быстро выцветавших под лучами солнца.

В данном же случае эта особенность положена в основу управления генерацией лазера. Так называемый нелинейный затвор. Тот самый третий способ, о котором мы хотели узнать.

Если сосудик с таким красителем поставить перед одним из зеркал лазерного резонатора, зеркало окажется закрытым. Добротность резонатора упадет до нуля. Обратная связь станет невозможной. Создается впечатление, что генерация не начнется, сколь сильно ни будет возбуждено активное вещество. Но это не так. При больших уровнях возбуждения усиливающая способность активного вещества становится весьма значительной. Даже несколько фотонов, случайно испущенных активными ионами вдоль лазерного стержня, уже за один пролет по направлению к сосудику с красителем вызовут появление такого количества вынужденных фотонов, что их поглощение в красителе вызовет его заметное выцветание и просветление.

В результате часть фотонов пролетит сквозь приоткрывшийся затвор к зеркалу и обратно к активному веществу. Так начнется действие обратной связи, а значит, возникнет самовозбуждение лазера. Скорость развития процесса оказывается очень большой, ибо лавинообразное размножение фотонов в активном веществе вызывает столь же лавинообразное просветление красителя, а значит, увеличение обратной связи. Так рождается гигантский импульс.

Стремление достичь еще большей мощности лазерных импульсов, еще сильнее сократить их длительность заставило ученых внимательно изучить процесс возникновения и развития гигантских импульсов.

Существенный успех увенчал усилия Басова, Летохова и их сотрудников. Летохов был, пожалуй, первым, подчеркнувшим роль флуктуаций в зарождении и развитии гигантского импульса.

Как только излучение накачки обеспечит достаточно сильное возбуждение активного вещества, отдельные фотоны, излучаемые возбужденными ионами по законам случая, будут вызывать независимые миниатюрные микролавины. Развитие большинства из них обрывается на границе активного вещества или при встрече с затвором. Едва затвор немного приоткроется, множество микролавин, родившихся непосредственно перед этим и летящих в подходящем направлении, положат начало процессу самовозбуждения, хотя вначале их интенсивность может различаться в десятки раз.

Эксперимент дал неожиданный результат: гигантский импульс не является гладким,

как казалось ранее. Он сложен из совокупности еще более коротких импульсов! Что это?! Движение по кругу? Ножка, подставленная светом ученым, которые так долго, так упорно стремятся покорить его?

Ведь еще Хеллворс дисциплинировал пресловутые пички и объединил их в монолитный мощный импульс. И внимание ученых было сосредоточено лишь на проблеме увеличения его мощности. И вот они добились огромных успехов. Они повысили мощность, и, казалось, закончился один из самых трудоемких этапов работы. И что же? Начинать сначала? Они пришли в ту самую точку, откуда начали трудное движение?

Лишь тщательные исследования, размышления, споры помогли понять: происшедшее — не ошибка, не неудача.

Начинался следующий виток спирали познания.

Глава IV. Быстрее быстрого и короче короткого

Снова гигантский импульс

Человека влечет не достигнутое. Альпиниста — непокоренная вершина; агронома — небывалый урожай; летчика, шофера, моряка, бегуна, пловца, конструктора вычислительных машин или создателя станков — быстрота. Многие, очень многие стремятся к достижению небывалых скоростей. Но, пожалуй, только в одном случае фантастическая скорость возникла как подарок людям, стремившимся к совершенно другой цели.

Множество применений лазеров требует все большей концентрации энергии в пространстве и во времени. Однако в природе существует целый ряд запретов, близких к знаменитому соотношению неопределенностей, обнаруженному одним из создателей квантовой механики, Гейзенбергом. Такой запрет ограничивает и возможность пространственной концентрации — фокусировки света лазера в пятнышко, размеры которого существенно меньше длины излучаемой волны.

Но в первом рубиновом лазере концентрация энергии во времени была еще очень далека от предела. Этот лазер, как, впрочем, и большинство современных импульсных лазеров, испускал серию хаотически следующих один за другим импульсов длительностью около миллионной доли секунды каждый. Вспышка лазера содержала сотни таких отдельных пичков и длилась примерно тысячную долю секунды. Многие пытались понять, почему генерация лазера не развивается непрерывно, а быстро обрывается, чтобы начаться вновь в виде очередного пичка. Ничего подобного не наблюдалось ни в ламповых генераторах, ни даже в квантовых генераторах радиодиапазона — мазерах. Было опубликовано несколько теорий, каждая из которых убедительно объясняла причину возникновения пичков, но все причины... были различными. Тем не менее, все теории достаточно убедительно подтверждаются опытом.

Постепенно выяснилось, что главная причина — в размерах резонатора. Резонатор лазера обычно во много миллионов раз больше длины световой волны. Поэтому структура электромагнитного поля в нем много сложнее, чем в резонаторе мазера, в котором укладывается самое большее несколько волн.

В резонаторе лазера может возникать много различных типов колебаний. Они не равноправны между собой. Для некоторых добротность резонатора больше, и они возбуждаются легче, чем другие. Неравноправие возникает и из-за присутствия внутри резонатора активного вещества — рубина, стекла и т. п., — а также вследствие неравномерного поступления света ламп накачки в толщу активного вещества.

В результате различные типы колебаний начинают и кончают процесс генерации почти независимо от других, а затем через некоторое время в них вновь возникает пичок генерации. Энергия отдельного пичка невелика, ибо в его образовании участвует лишь малая

доля активных частиц, возбуждаемых лампой накачки.

Способ концентрировать энергию лазера во времени, объединить большинство активных частиц для генерации одного импульса излучения и таким образом увеличить мощность лазера был найден Хеллворсом. Он предложил для этого управлять резонатором лазера. Открывать при помощи быстродействующего затвора одно из зеркал резонатора, которое в начальный момент закрыто этим затвором.

В результате накачка активных частиц длится дольше, чем при открытом зеркале. Ведь без системы двух зеркал нет резонатора и невозможна генерация. К моменту открытия затвора в резонаторе накапливается много больше активных частиц, чем в обычном лазере. Лавина генерации развивается очень быстро и интенсивно, и излучение лазера собирается в один гигантский импульс длительностью в несколько сотых частей от миллионной доли секунды. Несмотря на то что энергия этого импульса обычно в несколько раз меньше энергии вспышки обычного лазера, состоящей из множества пиков, мощность его в сотни тысяч раз больше. Ведь мощность характеризует среднее значение энергии, выделяемой за единицу времени, так что, если время сокращается, мощность растет. Поэтому мощность, развиваемая порохом при ружейном выстреле, соизмерима с мощностью огромной турбины. Но заряд патрона, способный с большой скоростью вытолкнуть пулю, не может совершить и малой доли работы, выполняемой неумолимой турбиной. Гигантская мощность импульсов лазеров с управляемым резонатором позволяет решать множество сложнейших задач науки и техники. Однако существуют и такие случаи, когда достигнутая мощность недостаточна. Известны и такие ситуации, при которых важна не столько мощность, сколько энергия лазерной вспышки.

Наиболее прямой способ наращивания энергии лазера за счет увеличения размеров активного элемента, оправдавший себя в лазерах, работавших в обычном режиме свободной генерации с его хаотическими пиками, не давал результатов при переходе к гигантскому импульсу. Исследования показали, что для главных лазерных материалов — рубина и неодимового стекла — это не случайность. Причиной неудачи являются те же особенности этих материалов, которые обеспечивают их выдающиеся достоинства с точки зрения обычных лазеров.

Неодимовое стекло и рубин способны запасать в каждом своем кубическом сантиметре сравнительно большие порции энергии. А свойства ионов неодима и хрома таковы, что усиление света в них при прохождении каждого сантиметра длины весьма велико. Благодаря большому коэффициенту усиления лазеры на этих веществах легко возбуждаются даже при сравнительно плохих зеркалах. Если активные элементы достаточно длинны, то одно из зеркал резонатора может совершенно отсутствовать. Его с успехом заменяет отражение света от торца активного элемента.

Ясно, что в этом случае режим гигантского импульса совершенно неосуществим. Генерация начнется при закрытом затворе, несмотря на малую добротность резонатора, образованного одним зеркалом и торцом активного элемента. Инженеры спасли дело, сошлифовав торец под углом к оси резонатора. Генерация с участием торца стала невозможной, и управление резонатором при помощи затвора, помещенного перед вторым зеркалом, осуществилось без помех.

Но измерения показали, что по мере удлинения активного элемента неукоснительно возрастали и потери энергии в режиме гигантского импульса по сравнению с энергией свободной генерации. И устранить это в рубине и неодимовом стекле не удалось. При высоких уровнях возбуждения, создаваемых накачкой при закрытом затворе, в них возникают чрезвычайно-большие коэффициенты усиления. Столь большие, что фотоны, случайно вылетающие вдоль оси активного элемента, вызывают в нем вынужденное испускание массы фотонов, уносящих значительную часть энергии, поступающей в активный элемент от ламп накачки. Этим ограничивается возможность накопления в активном элементе больших запасов энергии, а следовательно, и возможность увеличения энергии гигантского импульса.

Так природа выдвинула перед учеными и инженерами непреодолимое препятствие. Возможности метода управляемого резонатора оказались исчерпанными. Требовалось что-то новое. Новые активные материалы для того, чтобы достичь больших энергии известным методом, или новые методы, позволяющие достичь того же с применением известных материалов. Первый путь еще не реализован, но некоторые из ученых считают, что они добьются своего. Второй путь уже позволил увеличить энергию гигантских импульсов в несколько раз и одновременно привел к совершенно неожиданным результатам.

Поворот

Все казалось очень простым. Если возможности генераторов гигантских импульсов исчерпаны, нужно пропустить излучаемые ими импульсы через усилитель. Ясно, что так можно достичь увеличения энергии. Но когда энергия импульса, попадающего на вход усилителя, очень велика, следует ожидать и дополнительного эффекта. Здесь не было ничего нового. Еще при исследовании одного из типов квантовых усилителей радиодиапазона — мазера с бегущей волной — было установлено, что при больших входных сигналах форма усиленного импульса искажается.

В радиодиапазоне, где сигналы используются для передачи информации, всякое искажение в процессе усиления, конечно, вредно. Чтобы бороться с искажениями, радисты изучили причину их возникновения. И установили, что по мере распространения импульса сквозь усиливающую среду сигнал, заключенный в его передней части, особенно на фронте импульса, все больше усиливается, отбирая энергию от активных частиц вещества.

Если сигнал был очень силен еще до усиления, то передний фронт импульса забирает практически всю энергию, запасенную в веществе. На долю последующих частей ничего не остается. Они не только не усиливаются, но оказываются ослабленными, ибо, отдав свою энергию фронту импульса, вещество стремится приобрести его вновь за счет электромагнитного поля, образующего остальные части импульса. В результате, продвигаясь по активному веществу, фронт импульса быстро усиливается, становясь все более крутым, а его хвост заметно ослабляется. Ясно, что при этом одновременно с увеличением интенсивности импульса он неизбежно сокращается во времени. Мощность импульса растет одновременно за счет двух причин — в результате увеличения его энергии и по мере ее концентрации во времени.

Но радиоинженеры не могли использовать устройство, в котором усиление сигнала сопровождается такими искажениями. Вывод? Подобная ситуация возникала перед кочевниками-скотоводами при перегоне больших стад. Передние гурты поглощают всю траву и набирают вес, не оставляя ничего для последующих, которые постепенно тощат. Избежать этого можно, лишь направляя гурты параллельными тропами или поочередно, с интервалами, достаточными для восстановления травостоя. Примерно так поступили и радиоспециалисты. Но подробности их работы нас сейчас не интересуют.

Специалисты в области лазеров, стремившиеся к увеличению энергии и мощности импульсов света и не думавшие в то время о неискаженной информации, рассчитывали, что все особенности квантовых усилителей, приводящие к трудностям в радиодиапазоне, пойдут им на пользу. Соответствующие качественные рассуждения были проведены еще в 1962 году Гейзиком и Сковиллом в США, но их работа, как это часто бывает, опередила время и не вызвала большого интереса. Лишь через год две группы американских авторов опубликовали первые расчеты, а еще через год более полную теорию напечатали В.И. Таланов из Горького, а также Л.А. Ривлин и А.Л. Микаэлян с сотрудниками из Москвы.

В том же году Басов с сотрудниками и еще через год Ривлин со своими сотрудниками, а за границей Е. Стилл и В. Дэвис направили гигантский импульс своих лазеров в лазерный усилитель, и... их ожидания не оправдались. Существенного сокращения длительности импульса за счет искажения его формы при усилении не получила ни одна из трех групп!

Через год упорной работы Басов с Летоховым опубликовали объяснение причин неудачи и способ достижения поставленной цели. В их статье содержалось и вызвавшее столько волнений среди любителей сенсаций указание, что гребень импульса должен при известных условиях бежать быстрее света.

Владлен Степанович Летохов — необычная фигура даже для Физического института имени П.Н. Лебедева, богатого своеобразными, талантливыми людьми. Как и многие, он пришел в лабораторию квантовой радиофизики студентом. Басов скоро обнаружил у него склонность и способность к теоретическим исследованиям. Летохов не только сидел дни и ночи, склонившись над письменным столом, но внимательно присматривался к ходу экспериментов. Обсуждал с экспериментаторами постановку опытов и их результаты. Быстро сопоставлял их с предсказаниями теории и немедленно приступал к усовершенствованию теории, если того требовал опыт. В 1965 году начинается публикация работ, посвященных распространению импульса света в усиливающей среде. Сперва теоретические работы Басова и Летохова, затем описание опытов, проведенных с их участием, снова теория и дальнейшие опыты. И так несколько лет.

Когда защищать диссертацию?

Отвлечемся немного от лазеров к другой проблеме, имеющей, впрочем, непосредственное отношение к науке. Спросим себя, когда ученый должен защищать диссертацию. Скажем, кандидатскую диссертацию. Принято считать, что он должен сделать это после того, как выполнит несколько исследований, бесспорно лежащих на уровне кандидатских работ.

Никто из знавших Летохова только по публикациям не мог предположить, что он, опубликовавший за четыре года более полусотни работ, не имеет кандидатской степени. И когда в конце 1969 года он под нажимом товарищей представил наконец кандидатскую диссертацию, ученый совет, присудив ему степень кандидата, рекомендовал представить эту же работу вторично на соискание степени доктора наук. Но Летохов не пошел по легкому пути. Он предпочел написать новую диссертацию и весной 1970 года блестяще защитил ее. В его диссертации речь шла и о сжатии лазерного импульса при усилении, и о сверхсветовом движении. Но вернемся на несколько лет назад.

Сейчас каждый школьник знает, что скорость света — высший предел скорости. Парадоксы, связанные с этим фундаментальным законом, встречаются все реже. И вот, солидные ученые предсказывают сверхсветовую скорость. А затем вместе с другими сотрудниками лаборатории квантовой радиофизики они получают как сверхсветовую скорость движения гребня импульса, так и дальнейшее сокращение длительности гигантского импульса.

Теория Басова и Летохова учитывает немаловажную деталь, которая выпадала из поля зрения предыдущих теорий: как ни быстро развивается генерация гигантского импульса, он не возникает мгновенно. На экране скоростного осциллографа можно видеть, что передний фронт гигантского импульса совсем не напоминает ступеньку, а плавно нарастает, причем медленнее, чем время, в течение которого протекают важнейшие процессы в усиливающей среде. В результате отдельные активные частицы взаимодействуют с усиливаемым импульсом не когерентно — независимо одна от другой.

Преимущественное усиление пологой головной части импульса приводит к постепенному перемещению гребня импульса вперед по переднему фронту так, что максимум импульса не бежит вместе с гребнем какой-либо определенной волны, а постоянно передается от задней волны к передней. Нечто подобное можно было бы увидеть, если бы колонна демонстрантов, не прекращая движения, передавала бы транспарант от задних рядов в передние. Здесь нет ничего противоречащего законам природы, в частности — невозможности перемещения материальных тел со скоростями, превышающими скорость

света. В этом опыте со сверхсветовой скоростью движется не какое-либо тело или порция энергии, а лишь зона, в которой наиболее интенсивно происходит превращение энергии, запасенной в активных частях, в другую форму, в форму фотонов световой волны. Теория Басова и Летохова не только предсказала возможность движения гребня гигантского импульса со скоростью, в несколько раз превышающей скорость света, но и объяснила, почему при этом не происходит сокращения длительности импульса.

Успех

Причиной является именно то, что гигантский импульс возникает не скачком, а развивается хоть и быстро, но постепенно от очень малых энергий. Слабые участки переднего фронта, простирающиеся далеко впереди его гребня, эффективно усиливаются, пробегая по наиболее «богатым», еще не затронутым главной частью импульса, частям усилителя. Будучи слабыми, они усиливаются без искажения, так что перед наблюдателем возникают все новые и новые участки переднего фронта, первоначально замаскированные шумами. В результате импульс возрастает, лишь незначительно деформируясь, как морская волна, приближающаяся к берегу по мелководью. Морская волна опрокидывается, набегая на берег. Можно заметить, как перед опрокидыванием ее передний фронт становится все более крутым. Гребень настигает его. Катастрофа возникает именно потому, что первыми выбегают на берег и разрушаются самые слабые передние волны. Нечто подобное необходимо и для сжатия лазерного импульса. Басов и Летохов установили, что для сжатия импульса в процессе усиления нужно отсечь слабые участки его переднего фронта, чтобы они не истощали активного вещества перед приходом гребня. Нужно с самого начала придать переднему фронту импульса форму, напоминающую ступеньку. Тогда именно передняя часть ступеньки будет отсасывать всю энергию, запасенную в усилителе. Гребень будет расти, последующие части импульса — ослабевать, как это предсказывал еще Сковелл, и сокращение импульса станет реальностью.

Для проверки теории Басов с сотрудниками установили между усилителем и лазером, дающим гигантский импульс, дополнительный затвор. Специальная схема чрезвычайно быстро открывала его только после того, как гигантский импульс достигал своего максимума. Поэтому перед гребнем гигантского импульса в усилитель не поступало никакого света. Зато гребень гигантского импульса имел возможность извлекать из активного материала всю запасенную в нем энергию. Затвор действовал так быстро, что передний фронт импульса на входе усилителя напоминал крутую ступень. И действительно, вся энергия, скопленная в усилителе, выплескивалась на гребень импульса. Измерения показали, что длительность импульса на выходе усилителя уменьшалась в несколько раз. Только за счет сокращения настолько же возрастала и мощность импульса. В действительности мощность увеличивалась еще быстрее, ибо импульс сильно возрастал за счет энергии усилителя.

Теперь во всех лабораториях, имеющих дело с гигантскими импульсами лазеров, сочетающих большую мощность с большой энергией, между лазером и усилителем включают дополнительный затвор, придающий переднему фронту импульса форму ступеньки. Об опытах со сверхсветовым движением лазерных импульсов теперь можно прочитать лишь в старых журналах и в учебниках по квантовой электронике. Такова судьба многих парадоксов. Они стимулируют ум, обостряют внимание и интерес и, сыграв свою роль, попадают в основные фонды прогресса, в тот отдел, где столь же почетное место занимают прялка и каменный топор. А менее эффектные результаты зачастую продолжают и в наши дни служить человеку. Так случилось и с этой работой советских ученых, для которых одинаково важны и фундаментальные исследования, и практические результаты.

Для любителей математики

Формулы умнее человека. Это сказал Генрих Герц, открывший электромагнитные волны, существование которых было предсказано в конце прошлого века Кларком Максвеллом. Герц имел в виду знаменитые уравнения Максвелла, в которых содержатся не только законы поведения электромагнитных волн, но и разгадка многих неизвестных в то время явлений.

О метрологии можно сказать, что она предусмотрительнее человека. Метрология заготовила впрок возможность измерения чрезвычайно больших и крайне малых величин и даже построила для них систему наименований задолго до того, когда техника нашла способы их достижения. В самом деле, понадобилось для радиолокации название импульсов длительностью в миллионную долю секунды — пожалуйста. В реестрах метрологов предусмотрена специальная единица — микросекунда. Хотя до этого люди редко имели дело даже с длительностями, меньшими тысячной доли секунды, — миллисекундами. Появились лазеры, дающие очень короткие импульсы света, и наготове еще более мелкая единица — наносекунда — для измерения миллиардных долей секунды. Но и этого оказалось недостаточно. Сейчас идет борьба за получение и измерение еще в тысячу раз более коротких — пикосекундных импульсов. Впрочем, физики уверяют, что длительность жизни некоторых из все размножающегося семейства элементарных частиц должна быть еще более короткой. Но это лежит за пределами нашей темы. Здесь же речь пойдет о рождении пикосекундных импульсов света.

Для любителей математики можно добавить, что десятичная система чисел позволяет очень просто, наглядно и компактно записывать такие невообразимо малые величины. Для этого вместо длинного ряда нулей достаточно написать десятку и возвести ее в отрицательную степень, показывающую то место после запятой, где стоит первая отличная от нуля цифра. Например, вместо одной десятой можно писать 10^{-1} , вместо одной тысячной — 10^{-3} (здесь единичка стоит на третьем месте справа от запятой: 0,001). В соответствии с этой записью миллионная доля (микро) — это 10^{-6} , миллиардная доля (нано) — 10^{-9} , а интересующая нас сейчас пикосекунда — 10^{-12} секунды.

Первый лазер, созданный в 1960 году Мейманом, генерировал вспышки света длительностью около миллисекунды. И они состояли из хаотической последовательности микросекундных пичков. Уже в следующем году Хеллворс изобрел лазер, в котором специальный затвор быстро изменял добротность резонатора от очень малой до весьма большой величины. Лазер генерировал гигантские одиночные импульсы длительностью в несколько десятков наносекунд.

Дальнейший путь уменьшения длительности импульсов оказался неожиданно трудным. Несколько групп ученых, следуя умозрительным, лишь качественным, а не количественным рассуждениям Гейзика и Сковелла, безуспешно пытались укоротить гигантские импульсы, пропуская их через оптический усилитель.

Лишь сложное теоретическое исследование, проведенное Басовым и Летоховым, позволило понять причину неудач и найти выход из тупика. Но этот путь не привел к существенному продвижению. Конечно, укорочение гигантского импульса до двух-трех наносекунд с одновременным усилением их энергии позволило проникнуть дальше в глубь тайников природы. Но ученые жаждали радикальных результатов.

Как это ни парадоксально, труднее всего добиться новых значительных достижений, идя по проторенному пути. Легкая, прямая и привлекательная дорога в мире науки обычно тянется недалеко. А дальше неизбежные повороты ведут к ухабам, а то и в тупик. Но — такова человеческая натура — трудно решиться свернуть на целину, если впереди видны накатанные трассы. Если говорить о дорогах, ведущих в мир сверхкоротких импульсов света, то одну из них проложила нелинейная теория колебаний, созданная и развитая главным образом трудами двух советских школ физиков и математиков: школы Мандельштама — Папалекси и школы Крылова — Боголюбова. Нелинейная теория

колебаний вскрыла и взяла на вооружение глубокое единство, скрытое за внешним различием многообразных периодических процессов, происходящих в природе и создаваемых человеком для нужд техники.

Голландский ученый Ван дер Поль, сделавший существенный вклад в нелинейную теорию колебаний на первых этапах ее развития, обнаружил удивительную аналогию между работой сердца и лампового генератора электрических колебаний. Впоследствии удалось создать удобные радиотехнические модели для исследования работы сердца, почек, легких и других органов человеческого тела. Методы нелинейной теории колебаний теперь широко применяются в биологии и химии, астрофизике и сейсмологии, в инженерных науках и в экономических исследованиях.

Лазеры возникли благодаря проникновению методов нелинейной теории колебаний в оптический диапазон. Отнюдь не случайно квантовую электронику создали радиофизики Басов и Прохоров, блестящие представители школы Мандельштама — Папалекси, и Таунс — тонкий знаток нелинейной теории колебаний. Своему дальнейшему развитию, даже продвижению в оптический диапазон, квантовая электроника обязана скорее радиоспециалистам, освоившим оптику, а не оптикам, постигшим закономерности теории колебаний.

Царство хаоса

В большинстве случаев активное вещество лазера не участвует в его работе как единое целое. Обычно различные части рабочего объема начинают генерацию не одновременно и даже на нескольких различных частотах. Причина лежит в том, что резонатор лазера очень велик по сравнению с длиной световых волн. Поэтому в нем может возникнуть и обычно возникает множество различных и независимых типов колебаний.

Нечто подобное можно наблюдать на струне скрипки или мандолины, на которой, кроме основного тона, легко возбудить и обертоны. Музыканты редко пользуются такой возможностью. Но радиоинженеры прибегают к ней во многих случаях, когда им нужно создавать короткие электрические импульсы, например в радиолокации или телевидении. Для этой цели придуманы специальные схемы. Наиболее известны среди них мультивибраторы и блокинг-генераторы, в которых одновременно возбуждается множество колебаний, складывающихся друг с другом так, что они образуют серию коротких импульсов или острые одиночные всплески напряжения, по команде которых на экране возникают причудливые картинка или срывается с места стремительная ракета.

В отличие от таких ламповых генераторов в лазерах царствует полный хаос. Неизбежные неоднородности в кристаллах, стеклах и даже в газах, служащих активным веществом в лазерах; невозможность обеспечить совершенно однородное возбуждение по всему объему лазера; большое число типов колебаний, возникающих в резонаторе лазера, — все это приводит к тому, что большинство типов колебаний обычно возбуждается независимо от других. Глядя, конечно через защитные очки, на яркое пятно света, образуемое лучом газового лазера, мы в первый момент видим нечто подобное солнечному зайчику. Но, присмотревшись внимательно, замечаем, что яркое пятно состоит из отдельных хаотических переливающихся зернышек, разделенных менее яркими полосками. Очень похоже на поверхность Солнца, наблюдаемую через телескоп. Там тоже заметно множество ярких точек на менее светлом фоне.

Конечно, физики понимали, что причины, приводящие к возникновению солнечных гранул и ярких точек в луче газового лазера, различны. Общее в них лишь одно — существенная роль случайности в распределении температуры по поверхности Солнца и в развитии генерации в активном элементе лазера.

Те же явления возникали и в твердотельных лазерах, работающих в импульсном режиме. И в них случайное и независимое возбуждение отдельных типов колебаний

приводит к возникновению хаотических пиков генерации. Экспериментаторы и теоретики объединились в анализе этой противоречивой работы лазеров.

Подробное исследование гигантских импульсов, даваемых лазерами с управляемыми затворами или с вращающимися призмами, показало, что и такие гигантские импульсы образованы в результате возбуждения многих типов колебаний.

Теория колебаний подсказывала: лазер отличается от лампового генератора только, длиной генерируемой волны и некоторыми техническими деталями; они основаны на единых принципах. Значит, можно заставить различные типы колебаний возникать в лазерах так же согласованно, как, например, в мультивибраторе. В таком случае лазер будет давать регулярную последовательность коротких импульсов.

Естественно, что по такому пути направились многие исследователи. Первыми добились успеха Л. Харгров, Р. Форк и М. Поллак, работавшие с газовым лазером. Затем работа с рубиновым лазером принесла удачу Т. Дейтчу. И наконец торжествовали победу А. Де Мария, С. Феррар и Г. Даниэльсон, работавшие с лазером на неодимовом стекле.

— Мы принудительно периодически изменяли потери в резонаторе лазера, — объясняли коллегам ученые.

Применяли они привычный для радиоспециалистов прием: меняли в резонаторе условия существования электромагнитных волн. Но простой прием приводил к непростым результатам. Если при этом частота изменения потерь совпадала с частотным интервалом между простейшими типами колебаний резонатора, типы оказывались связанными.

Теория колебаний не подвела. Лазер, который в режиме свободной генерации давал миллисекундные импульсы, состоящие из множества пиков, превратился в генератор наносекундных импульсов. Если в результате внешнего воздействия достигалась связь между двадцатью типами колебаний, длительность импульсов составляла всего половину наносекунды. Это в пять-десять раз короче, чем в лазерах с вращающейся призмой!

Рекорд, сенсация! Он дал новый толчок поискам и усилиям. Путь оказался очень заманчивым, простым, легко выполнимым. И давал быстрые и ощутимые результаты. Надо было только овладеть способностью чувствовать особенность материалов лазеров. Какие из них на что способны. Что из них можно выжать. Насколько они гибки в способности лепить нужные физикам импульсы света. Некоторые ученые даже обнаружили в себе своеобразное чутье, интуицию в подборе нужных для новой цели лазерных материалов.

И вот половина наносекунды — этот недолгий рекорд вновь побежден.

Снова тупик

Еще в десять раз более коротких импульсов добился американский ученый М. Ди Доменико с сотрудниками. Они периодически управляли потерями в лазере на совсем новом в то время материале — кристалле иттрий-алюминиевого граната. Но дальше дело не пошло. Прямой путь на этот раз кончился тупиком. Выход из него могло дать лишь озарение или тщательное изучение причины неудач.

Дальнейший скачок совершил также американский физик Де Мария с сотрудниками. Скачок, который измерялся тысячами единиц удачи, а не десятками или сотнями, как то бывает при движении по традиционному пути. За Де Марией быстро последовали группы Басова и Прохорова. Теперь новый источник пикосекундных импульсов получил широкое применение, стал повседневностью в обиходе этого круга ученых, стал необходимой обычностью.

Все казалось очень простым в первом опыте Де Марии. Можно сказать, что он не сделал ничего нового. Лишь более подробно изучил то, что получали раньше и он и другие. Получали, не зная, что находится у них в руках.

Де Мария и его сотрудники применяли для управления добротностью лазера насыщающийся поглотитель. То же делали и другие. Все было очень просто. Внутри

резонатора лазера помещался тоненький сосудик, заполненный раствором специального красителя. Плохого красителя, с точки зрения любого разумного человека. Этот краситель никуда не годится для обычного применения, он быстро обесцвечивается под действием света. Становится прозрачным. Но почему-то именно такой краситель физики вымаливали у химиков.

Сосудик с красителем заслонял одно из зеркал резонатора. Несмотря на то что лампа-вспышка накачивала активное вещество, генерация не могла начаться. Ведь при закрытом зеркале отсутствовала обратная связь, необходимая для возникновения генерации. Но по мере повышения уровня возбуждения активный стержень начинал светиться все ярче и ярче. Его усиливающая способность становилась столь большой, что фотоны, летящие вдоль его оси, были способны увлечь за собой сотни таких же фотонов. Наконец их становилось так много, что под их действием краситель начинал выцветать. И часть фотонов устремлялась ко второму зеркалу и потом обратно. Так возникала обратная связь, приводящая к возникновению генерации. К лавинообразному возрастанию числа фотонов, летящих вдоль оси резонатора. Из лазера в определенный момент вылетал гигантский импульс излучения. В нем как бы сосредоточивалась вся та энергия фотонов, которая накапливалась до того, как краситель выцвел и дал лавине фотонов прорваться к зеркалу. Это не было новостью в 1966 году. Но лишь Де Мария и его сотрудники обнаружили, что в отличие от гигантских импульсов, получаемых при помощи вращающейся призмы или электрооптического затвора, новый импульс состоял из регулярной последовательности удивительно коротких импульсов.

Измерения показали, что эти импульсы возникают точно через интервалы, нужные свету для того, чтобы пройти от полупрозрачного зеркала через активное вещество к глухому зеркалу и обратно. Длительность каждого из них составляла несколько пикосекунд, несколько единиц, умноженных на 10–12 секунды! Всем было ясно, что явление, обнаруженное в этих опытах, возникает потому, что отдельные типы колебаний, излучение которых участвует в просветлении красителя, оказываются связанными между собой. Связь возникает вследствие их совместного взаимодействия с красителем. Это самофазировка, — определяют явление физики, — и она отличается от принудительной фазировки, получающейся в результате периодического изменения потерь резонатора, применявшегося ранее для получения коротких импульсов.

Единственным огорчением Де Марии было то, что полученные им импульсы имели малую энергию. И тем не менее, несмотря на малую энергию каждого отдельного импульса, в опыте Де Марии она составляла лишь сотые или даже тысячные доли джоуля, малая длительность обеспечивала огромные мгновенные мощности, достигавшие миллиардов ватт.

Пропустив эти импульсы через лазерный усилитель, Де Мария еще больше увеличил их мощность. А вскоре Басов с сотрудниками достигли таким путем рекордной мощности в тысячу киловатт. Один из любителей обобщений пришел к выводу, что после создания лазеров в 1960 году мощность генерируемых ими импульсов света возросла ежегодно примерно в десять раз! Сколь долго будет продолжаться этот рост?

Вмешательство теоретика

Лазер, дающий ультракороткие сверхмощные импульсы света, этот феномен современной физики, стал объектом детального экспериментального и теоретического исследования во многих лабораториях. Он был загадкой и в теоретическом отношении, и в отношении тех возможностей, которые таились в его сдерживаемой мощи, выбрасываемой внезапно, как яд жалящей змеи.

В течение двух лет после того, как Де Мария открыл явление образования пикосекундных импульсов и выявил его основные черты, постепенно сформировалась и стала общепринятой весьма наглядная точка зрения на процесс образования этих импульсов.

Считалось, что в результате взаимодействия нескольких простейших типов колебаний лазера при участии просветляющегося красителя образуется импульс света длительностью в несколько наносекунд. Такой процесс был хорошо изучен для случая периодического изменения потерь, с которым мы уже знакомы. Казалось ясным, что дальнейшее сжатие этого импульса до пикосекундной длительности осуществляется в результате многократного прохождения импульса через краситель.

Однако эта простая и наглядная точка зрения встречалась с рядом трудностей. Летохов при помощи тщательных расчетов показал, что общепринятая точка зрения на механизм сжатия наносекундных импульсов недостоверна. Таким путем его длительность может уменьшаться лишь в 10...20 раз, а не в тысячи раз, как это наблюдается в действительности. Если общепризнанный механизм не способен превратить наносекундные импульсы в пикосекундные, нужно искать дальше. Следует еще раз проанализировать все детали опыта, особенно те, которые не вошли в общепринятую теорию, но влияют на результат.

Теоретик, который активно участвует в интересующих его экспериментах, — это большая удача для лаборатории. То, что большинство экспериментаторов считает само собой разумеющимся, не заслуживающим внимания, а тем более упоминания в докладе и статье, вызывает у Летохова особый интерес. Так у него возникает очередная догадка, очередной вопрос. Вопрос, который не может возникнуть у самого гениального теоретика, если он судит об эксперименте лишь по публикациям, в которые из-за недостатка места многие подробности не попадают.

Экспериментаторы знали, что любое лишнее препятствие, приводящее к отражению света внутри резонатора в направлении его оси, ухудшает условия образования пикосекундных импульсов. Знали — и устраняли все, что может им помешать. И не задумывались над тем, почему вредны именно отражения, а не поглощения света, не потери энергии. Так поступают многие. И не по лености ума. Нет, все их силы направлены на достижение цели. Они способны для этого преодолеть любые препятствия. Им просто некогда отвлечься от решения очередной задачи, от преодоления очередной каверзы матушки-природы. И что им до того, что лишняя отражающая поверхность внутри резонатора вместе с его зеркалами образует оптический фильтр, обрезающий и подавляющий многие простейшие типы колебаний. Выбрасывающий их из игры. Выбрасывающий! А они нужны для образования пикосекундных импульсов! Ведь не из прихоти экспериментаторы борются с лишними отражениями. Суровая необходимость заставляет их устранять все, что может играть роль фильтра, уменьшающего количество типов колебаний, одновременно участвующих в работе лазера. В чем же их роль?

Итак, не упускают ли экспериментаторы, борющиеся с отражениями, чего-то весьма существенного? Может быть, они, подобно герою Мольера, не знают о том, что говорят прозой!

Нужно вернуться обратно. К азам. Заново продумать процесс генерации лазера... Все в нем очень просто. Вспышка лампы накачки возбуждает активное вещество. Многочисленные типы колебаний резонатора независимо обеспечивают замыкание соответствующих каналов обратной связи. И в резонаторе возникают многочисленные независимые лазеры, каждый из которых, то вспыхивая, то затухая, излучает свои пички света, хаотически складывающиеся в то, что мы воспринимаем как лазерный импульс.

Хаос... Он не подвластен ни механике Ньютона, ни уравнениям Максвелла, ни теории относительности. Как разобраться в нем? Как усмирить, покорить? Однако и на него есть управа. Статистика. Она помогает понять безумие экономики. Направляет работу биологов. К услугам физиков она предоставляет свою дочь — статистическую физику. Ее и призвал на помощь Летохов.

Вот что она сказала ему.

При случайном наложении множества простейших типов колебаний в лазере возникают короткие всплески излучения со случайными длительностями и случайными амплитудами. Если в этом участвует десять-двадцать простейших типов колебаний, всплески

не могут быть короче нескольких наносекунд. Но когда в игре случайностей участвуют сотни колебаний, могут родиться пикосекундные импульсы. Причем их амплитуды будут заметно больше остальных.

Вот решение загадки! Тщательно устранив все отражения, используя хорошие активные элементы, можно обеспечить рождение сотен типов колебаний. Образуемые ими по воле случая пикосекундные импульсы скорее других прожигают путь через кювету с красителем, вызывают лавину генерации и, постепенно усиливаясь и укорачиваясь, раз за разом пробегают по резонатору, выплескиваясь через полупрозрачное зеркало в виде регулярной цепочки сверхкоротких импульсов.

Эксперимент, специально проведенный в ФИАНе при участии Басова и Летохова, подтвердил, что сверхкороткие импульсы действительно возникают до просветления красителя, а затем происходит их дополнительное сжатие и усиление.

Эта работа всколыхнула и теоретиков и экспериментаторов. Начались повторения опыта, уточнение результатов, соперничество умозаключений.

Планы

Вскоре Дж. Флек-младший прямыми численными расчетами подтвердил статистический механизм генерации ультракоротких импульсов. Кажется, все. Еще одна победа. Пора поставить точку и перейти к другой теме. Но время еще не настало. Басов, Летохов и их сотрудники хотят выжать все возможности из раскрытия тайны формирования сверхкоротких импульсов. Они увидели две новые возможности.

Вот первая. Она основана на весьма простом соображении. Лазер, который генерирует пикосекундные импульсы благодаря применению просветляющегося красителя, не вполне подвластен человеку. Действительно, момент просветления наступает по воле случая в результате сложной комбинации неуправляемых процессов. Все зависит от того, как развивается электрический разряд в лампе-вспышке, как накапливается энергия в активном элементе, как складываются между собой многочисленные типы колебаний, наконец, как проходит процесс обесцвечивания красителя.

Нужно подчинить себе главные этапы процесса. Подавить влияние случайности. Пусть раствор красителя будет столь концентрирован, чтобы самый интенсивный из импульсов, возникающих по воле случая в активном элементе, не мог его просветлить. Тогда, несмотря на действие лампы накачки, генерация не начнется.

Это лишь первый шаг. Теперь во время вспышки лампы накачки направим в активное вещество короткий импульс от вспомогательного лазера, достаточно интенсивный для прожигания красителя. Импульс откроет путь лавине фотонов, и она, раз за разом проходя через активное вещество, освободит всю запасенную в нем энергию, превратив ее в последовательность из нескольких мощных сверхкоротких импульсов.

Басов и его сотрудники построили такой лазер. Он состоял из, двух частей — лазера, дающего пикосекундные импульсы с энергией от 10^{-3} до 10^{-2} джоуля, и затвора, пропускающего во вторую часть установки только один из этих импульсов. Вторая часть представляла собой, по существу, лазерный усилитель бегущей волны. Его активный элемент располагался в одной из сторон треугольника, образованного тремя зеркалами. Рядом с ним помещалась и кювета с раствором красителя, достаточно концентрированным для того, чтобы полностью исключить возможность самовозбуждения усилительного каскада.

Но как только сверхкороткий импульс, поступавший из первой части установки, просветлял краситель, он, этот маломощный импульс, пять-семь раз обегал треугольник, образованный зеркалами, и выкачивал из активного элемента всю запасенную в нем энергию. Измерения показали, что полная энергия цуга из полученных таким образом пяти или семи сверхкоротких импульсов составляла 18 джоулей. А величина энергии импульса

при этом увеличивалась в несколько сот раз!

Установка оказалась рекордной для своего времени. Но в запасе у фиановских физиков есть еще пока не реализованные возможности.

Глава V. Против течения

Что будет, если...

Привычка... Есть ли в мире что-нибудь прочнее привычки? Впрочем, может быть, с ней поспорит доверие к авторитетам. Недаром столько нелепиц тысячелетия слыли истинами только потому, что таково мнение Аристотеля.

Века и века луч света был символом прямизны. Понадобилось мужество Френеля и его уверенность в мощи математики, чтобы признать за светом способность огибать препятствия. Но ученейшие из ученых — члены Французской академии наук — ему не поверили. И выдвигали очевиднейшие опровержения, основанные на многовековом опыте.

Из формул Френеля следовало, что за непрозрачным экраном область тени не появляется внезапно. Как бы набираясь сил, она возникает тонкими полосками, повторяющими контуры экрана и перемежающимися со все более слабеющими линиями света. Все знали, что это предсказание противоречит очевидным фактам. Более того, этот опальный инженер, изгнанный со службы во время наполеоновских Ста дней, этот физик-самоучка, по существу, предсказывал, что за отверстием в непрозрачном экране свет должен перемежаться с темнотой. Такого никто никогда не видел, и все были уверены, что так не может быть.

Рассудил опыт, который к тому времени уже утвердился в качестве высшего авторитета в науке. Но не безликий и безымянный «многовековый», а специально поставленный Френелем вместе с французским физиком Арго, простой, наглядный и доступный каждому, по крайней мере каждому студенту университета. И нехитрый опыт, и волновая теория Френеля вошли в золотой фонд науки. Их не опровергли, а лишь дополнили труды многих поколений ученых. Темперамент, по-видимому, более чем что-либо другое, определяет, займется ли человек развитием, дополнением, уточнением чужих результатов или ему предстоит выдвигать и отстаивать свои собственные новые идеи.

Не успел Гурген Ашотович Аскарьян по-настоящему акклиматизироваться в Физическом институте АН СССР имени Лебедева, как его новые друзья поняли — такой не удовлетворится развитием и уточнением. Вопрос: «Что будет, если?..» — не возникал у него только тогда, когда к данному случаю лучше подходил вопрос «почему?». А правильно поставленный вопрос — это половина ответа. И Аскарьян не успокаивался, пока не находил вторую половину.

Среди множества вопросов, преследовавших Аскарьяна и многих, на которые ему удалось найти ответ, к теме нашего рассказа относится такой: что будет, если луч лазера попадет в прозрачную для него среду? Природа среды неважна, существенна прозрачность. Не должно быть потерь энергии. Они только затуманят вопрос, восходящий еще к академику Вавилову: как влияет вещество на свет, если мощность света велика?

Размышления... Сопоставления, казалось бы, далеких фактов... Наскоро написанные и зачеркнутые формулы... Уныние и надежды... И вдруг озарение. Всегда вдруг. Вывод, от которого отскакивают все возражения.

На этот раз ответ гласил: должно существовать множество прозрачных веществ, в которых лазерный луч не будет расходиться, как следовало бы ожидать на основе бесспорной теории Френеля.

Нет, Аскарьян не думал опровергать теорию Френеля. Он не сомневался в ней. Просто он понял, что в наш лазерный век условия изменились. На авансцене появились новые силы,

совсем незнакомые Френелю. Силы, бывшие в то время второстепенными, вышли на первый план.

Давно забытый астроном Снеллиус установил закон преломления света. При переходе границы между двумя прозрачными средами падающий луч изламывается, давая начало преломленному. Первоначально ученые имели дело только с переходом света из воздуха в другую прозрачную среду или обратно — из такой среды в воздух. Угол между падающим и преломленным лучами в таких случаях определяется только свойствами среды. Точнее, лишь одной ее характеристикой, называемой показателем преломления.

Великий Максвелл считал эту величину одной из важнейших постоянных и ввел ее в свои знаменитые уравнения. Впрочем, уже в то время было известно, что показатель преломления не является постоянной величиной в полном смысле слова. Для каждого вещества он неизменен только при определенных внешних условиях. Он изменяется с температурой и давлением, под действием электрического и магнитного полей. Это знали все мало-мальски знакомые с оптикой. В свое время ученые, интересовавшиеся оптикой, в достаточной мере выяснили, как зависит показатель преломления от внешних условий.

В неведомое

Аскарьян знал, что лазеры открыли широкий путь в область, в которую еще не входил никто, кроме Вавилова и его учеников, — в область нелинейной оптики. Да и они лишь вступили на ее порог, только доказали реальность ее существования. В этой неизученной области «постоянные» величины изменяются даже при абсолютно неизменных внешних условиях. Они зависят от мощности самого света, и остро чувствуют его изменения.

Правда, при жизни Вавилова источники света были столь маломощны, что потребовалось все его искусство, чтобы продемонстрировать реальность таких процессов.

Но теперь положение в корне изменилось. Мощность лазерного луча может быть столь велика, что от него должен зависеть показатель преломления. А раз так, лазерный луч должен при известных условиях сам себя изгибать!

«Прежде всего это должно выявиться, — думал Аскарьян, — в отступлении от френелевских законов распространения света».

Из законов Френеля следует, что в оптике многое, кажущееся совсем простым, совершенно недостижимо. Например, никому не удастся получить совершенно параллельный пучок света, вырезав при помощи узкого отверстия середину почти параллельного пучка. Если первоначальный пучок выходил из широкого отверстия, то трудно установить, параллелен он или нет. Но если отверстие, при помощи которого вырезается узкий луч, достаточно мало, то установить не параллельность выходящего из него луча не составляет труда. Нужно лишь отойти достаточно далеко от отверстия.

Настоящая наука не терпит таких неопределенных понятий, как «достаточно». В этом случае, конечно, существует вполне определенное расстояние, на котором не составляет труда обнаружить распывание света поперек пучка. Для него существует даже специальное название — «дифракционная длина». И если размеры отверстия увеличить вдвое, она возрастает в четыре раза.

Дифракционное расширение пучков света не зависит от природы вещества. В пустоте оно таково же, как в любой прозрачной среде. И оно не зависит от интенсивности света. Лазерный луч любой мощности так же подвластен законам Френеля, как свет далеких звезд.

Идея Аскарьяна состояла в том, что под действием мощных лучей лазеров в некоторых веществах должны возникнуть новые процессы, способные преодолеть дифракционное расширение пучков света. В таких веществах мощные пучки света должны бежать не расширяясь, а еще более мощные должны даже сжиматься! Любой из процессов, приводящих к увеличению показателя преломления вещества, по мере возрастания интенсивности света может в конце концов побороть утечку энергии из пучка, вызванную

дифракцией.

Около ста лет назад шотландский ученый Джон Керр открыл явление, обнаружить которое хотел еще великий Ломоносов. В одной из своих программ Ломоносов писал: «Надо сделать опыт, будет ли луч света иначе преломляться в наэлектризованном стекле и воде». Этому же безуспешно пытался достичь гений эксперимента Фарадей.

Керр установил, что преломление света в стекле радикально изменяется, если поместить его между обкладками конденсатора, заряженного до высокого напряжения. Можно представить себе радость ученого, обнаружившего то, к чему безуспешно стремились его великие предшественники. Узкий луч света, идущий через стекло, при включении электрического напряжения внезапно расщеплялся на два, расходящихся под углом друг к другу. При выключении напряжения эффект исчезал. Да, в электрическом поле стекло вело себя иначе, чем обычно. Электрическое поле превращало стекло в подобие исландского шпата, кристалла, в котором еще в 1670 году копенгагенский профессор Эразм Бартолин обнаружил расщепление лучей света — двойное лучепреломление.

Тогда это было воспринято чуть ли не как фокус. Позже его наблюдали во многих кристаллах. А затем оказалось, что его можно вызывать искусственно и в тех кристаллах, где оно в обычных условиях не наблюдается, и даже в стекле. Для этого достаточно нажать на них или подвергнуть их неравномерному нагреву. И вот ему, Керру, удалось получить двойное лучепреломление под действием электрического поля!

Но... настоящего ученого отличает прежде всего способность к самокритике. Впрочем, эта способность отличает каждого настоящего человека независимо от его специальности. Керр знал, что двойное лучепреломление в стекле может быть вызвано и электрострикцией — деформацией тел под действием внешнего электрического поля. Подобная деформация, как и простое нажатие, делает свойства стекла зависящими от направления. Значит, необходимо еще убедиться, действительно ли обнаружено новое явление — появление двойного лучепреломления в результате непосредственного влияния электрического поля — или в процессе участвует электрострикция.

Но Керр знал и другое. Электрострикция не способна вызвать двойного лучепреломления в жидкостях. Значит, надо повторить опыт в жидкости. И Керр нашел жидкости, в которых наблюдается этот новый эффект, электрооптический эффект, вошедший в науку под названием явления Керра. Впоследствии Керр обнаружил, что появление двойного лучепреломления в некоторых веществах можно вызвать и при помощи магнитного поля, но это выходит за пределы нашей темы.

Для нас существенно, что электрооптический эффект не сводится к возникновению двойного лучепреломления. Электрическое поле, не только постоянное, как в опытах Керра, но и меняющееся во времени, в том числе и электрическая часть световой волны, приводит к изменению показателя преломления прозрачных тел. Причем показатель преломления увеличивается вместе с ростом интенсивности света. Это один из процессов, способных в соответствии с идеей Аскарьяна привести к компенсации дифракционной расходимости световых пучков.

История и география

Аскарьян рассказал о своих соображениях на семинаре по квантовой электронике, происходящем в ФИАНе с участием большинства московских и многих иногородних специалистов, а затем опубликовал свои результаты в известном во всем мире «Журнале экспериментальной и теоретической физики».

Эта небольшая статья отличается столь характерным для Аскарьяна богатством и новизной содержания. В ней показано, что явление имеет не только теоретическое, познавательное значение, но и чисто практическое, очень важное и перспективное. По мнению Аскарьяна, поперечную неоднородность поля интенсивного электромагнитного луча

можно по желанию использовать для втягивания электронов и атомов к оси пучка или для выталкивания их наружу и создавать таким способом сжатие или разрежение газа. Можно создать в газе канал для прохода электронов или плазмы. Сделать «пробку» у отверстия, соединяющего сосуды, в которых различны давления газа. Применить для нагрева плазмы, для транспортировки плазмы, для создания плазменных токопроводов. И конечно, для создания волноводов и самофокусировки...

Для многих специалистов, работающих в наиболее сложных областях физики плазмы, это прозвучало так, как если бы обыкновенному смертному сообщили, что теперь можно ходить по морю как посуху.

В 1963 году в тоненькой книжечке журнала «Письма ЖЭТФ» Н.Ф. Пилипецкий и А.Р. Рустамов сообщили о первом экспериментальном наблюдении нового явления — самофокусировке световых лучей. В их опытах были фотографически зарегистрированы тонкие светящиеся нити в жидкостях, через которые проходил предварительно сфокусированный луч рубинового лазера. В наши дни эффект самофокусировки проявляется в большинстве опытов, связанных с прохождением гигантских импульсов света лазеров через жидкости. Эффект можно наблюдать и в газах, и в твердых телах.

Новый эффект требовал и теоретического анализа. Первым рассчитал профиль светового пучка, самоканализирующегося под влиянием высокочастотного эффекта Керра, молодой физик из Горького, теперь уже профессор, В.И. Таланов.

Таланов принадлежит к третьему поколению замечательной советской школы физиков, основанной академиками Мандельштамом и Папалекси. Эта школа прославила нашу страну замечательными трудами и крупнейшими открытиями в области нелинейной теории колебаний, радиофизики, оптики и многих других сфер науки. Ко второму поколению этой школы принадлежат такие выдающиеся ученые, как академики А.А. Андронов и М.А. Леонтович. В ее третье поколение входят академики А.В. Гапонов, В.Л. Гинзбург, а также создатели квантовой электроники академик А.М. Прохоров и академик Н.Г. Басов, начинавший свою научную работу под руководством Прохорова, но бывший первоначально учеником академика И.Е. Тамма, сотрудника Мандельштама.

Пусть читатель простит меня за этот экскурс в научную генеалогию. Она здесь совсем не излишня.

А теперь ненадолго перейдем к истории и упомянем о географии.

В годы первой пятилетки наш народ начал поход за большой наукой. Расширились старые научные центры, создавались новые. Один из них был заложен на Волге, в старом промышленном городе Горьком. Школа Мандельштама послала туда крепкое ядро. В него вошли талантливые молодые физики А.А. Андронов, Г.С. Горелик, М.Т. Грехова и другие. Они поддержали и умножили традиции школы. И, в свою очередь, вырастили поколение учеников. К ним относится и Таланов.

Прежде чем заняться теорией самоканализирующихся световых пучков, Таланов успел внести существенный вклад в нелинейную теорию колебаний и в теорию распространения электромагнитных волн. Самоканализация электромагнитных волн — один из типичных примеров того, как нелинейности определяют наиболее существенные явления. Здесь Таланов был во всеоружии. Его теория была построена для распространения интенсивного пучка электромагнитных волн в плазме. Но в ней полностью содержалась основная картина — формирование волноводного канала в любой среде, где канал может поддерживаться действием самого поля. Впоследствии он разработал весьма общую теорию этого явления, получил ряд новых важных результатов. Но о них позже. Теперь мы должны пересечь океан.

В том же году, когда появилась работа Таланова, в журнале «Письма в Физические обозрения», печатающем только те статьи, которые и автор и редактор считают срочными, появилась статья Р. Чао, Е. Гармайр и Ч. Таунса «Самофокусировка луча оптического лазера». Американский физик Таунс, один из творцов квантовой электроники и лазера, не применяет слова «лазер», предпочитая ему сочетание «оптический мазер». Не наше дело обсуждать терминологические споры. Мне, как и другим непосвященным, они кажутся

лишенными глубокого смысла. Ведь лазер и оптический мазер означают точно одно и то же. Возможно, здесь играют роль вопросы престижа или более глубокие мотивы.

Статья начиналась так: «Ниже мы рассмотрим условия, при которых электромагнитный луч создает себе диэлектрический волновод и распространяется не дифрагируя». Авторы не знали о работе Аскарьяна, но позднее, узнав о ней, признали его приоритет. В отличие от Таланова, рассмотревшего в своей первой работе лишь движение электромагнитной волны в плоском канале, они рассчитали цилиндрический канал, возникающий в подавляющем большинстве опытов с лазерами. Их короткая статья содержит глубокое и ясное рассмотрение физической сущности двух процессов, способных вызвать самофокусировку и канализацию света, — электрострикции и керр-эффекта.

Таунсу и его сотрудникам удалось рассчитать, при какой мощности, в каких условиях будет подавлена дифракционная расходимость луча и он окажется захваченным в канал. Правда, значение критической мощности было вычислено только при учете электрострикции. Существенным ограничением явилось и то, что математические вычисления относились только к состоянию, при котором луч уже захвачен в канал. Как это произошло и возможен ли вообще процесс захвата, осталось за пределами математического рассмотрения.

Статья Таунса с сотрудниками стимулировала целый ряд исследований. П. Келли, по-видимому, первым рассмотрел процесс схлопывания первоначально параллельного пучка света и установил, на каком расстоянии после вхождения света в нелинейную среду происходит самофокусировка. Интересно, что, указывая на своих предшественников, Келли располагает их в таком порядке: Аскарьян, Таланов, Таунс с сотрудниками.

Келли получил свои главные результаты при помощи численных расчетов. Вскоре Таланов, а затем сотрудники Московского государственного университета С.А. Ахманов, А.П. Сухорукое и Р.В. Хохлов опубликовали аналитическое решение той же задачи. Однако приближенные методы, которые пришлось применить для решения этой весьма сложной задачи, теряли силу вблизи точки схлопывания. Численное решение Келли тоже не говорило ничего о том, что же происходит с пучком вблизи точки схлопывания и за ней. Мнение, высказанное впоследствии Келли, а также Талановым, таково: лазерный луч за точкой схлопывания переходит в очень тонкую и чрезвычайно интенсивную световую нить. То же писали Таунс и другие. Лишь Хохлов и его товарищи из МГУ допускали, что за точкой схлопывания возможно образование более сложного и узкого своеобразного световода, подобного нити с периодически изменяющимся поперечным сечением.

Все последующие теоретические работы исходили из того, что за точкой схлопывания возникает волноводный режим распространения света. Все они были посвящены уточнению отдельных деталей, повышению строгости математических выкладок, уточнению расчетов.

Все, решительно все экспериментальные работы тех лет подтверждали предсказание теории. В них сообщалось о том, что за точкой схлопывания наблюдается волноводное распространение света в виде очень тонких нитей. Экспериментаторы соревновались в уточнении мельчайших подробностей, изучении разнообразных частных случаев, в увеличении точности измерений.

Все сходилось на том, что эта область квантовой электроники в основном завершена. Были написаны итоговые статьи и монографии. Интересы исследователей постепенно перемещались в другие области науки.

Тонкое место

Как это часто бывает, благополучие и рутина чреватые катаклизмами. Они тем неожиданнее, чем более основательным кажется возведенное здание. Но катаклизмы безошибочно указывают, что под фундаментом нет достаточно надежной основы. Хорошо, если слабина своевременно обнаружена. Ее можно ликвидировать и продолжать украшать и

наращивать башни.

Однако нужно, чтобы делом занялся не эстет-архитектор, а любитель основательности, не гнушающийся сумрачной серости грунтов и обыденности фундаментов.

В нашей истории, к счастью, такой любитель нашелся. Молодой сотрудник лаборатории колебаний ФИАН, представитель четвертого поколения школы Мандельштама, Владимир Николаевич Луговой обратил внимание на известное всем тонкое место теории самофокусировки. В нем как в фокусе сошлись все варианты теории. Большинство авторов понимало трудности, возникавшие при попытке точно описать поведение лазерных лучей вблизи точки схлопывания. Понимали — и даже не пытались детально разобраться в том, что там происходит. Ведь приходилось ограничиваться приближенными теориями. А приближенные теории говорили разное.

Из одних получалось, что по мере приближения к этой точке лучи, ранее изгибающиеся к оси, постепенно начинали подходить к ней все более полого. В других теориях эти лучи выпрямлялись и входили в область, где теория теряла силу, так что продолжения всех лучей должны были бы сойтись в точке схлопывания, как в фокусе. В третьих... но не будем углубляться в различные варианты.

Во всех случаях оставалось совершенно неясным, как же лучи света ведут себя там, куда теоретики не могут проникнуть. Что с ними происходит дальше? Не берет ли дифракционная расходимость верх над нелинейными процессами там, где лучи сходятся слишком сильно? Не начинают ли сказываться какие-то еще не учтенные процессы?

Если лучи сходятся к оси все более полого, то сходятся ли они где-нибудь в точку или плавно переходят в тонкий канал, как думало большинство? Если же они, выпрямляясь, вонзаются в точку схлопывания, как в фокус линзы, то почему они не расходятся за фокусом? А может быть, они там вновь изгибаются и плавно входят в узкий канал? Или за фокусом лучи действительно расходятся, чтобы собраться вновь в следующем фокусе?

Эксперименты, впервые вполне уверенно произведенные Чао, Гармайр и Таунсом, обнаружили узкий канал, в который обращался луч, пройдя в среде именно тот путь, который предсказывала ему теория. Последующие опыты в большинстве случаев давали аналогичные результаты. Правда, в некоторых условиях возникали какие-то обрывки светящихся нитей, которые можно было толковать в пользу гипотезы периодически сужающихся каналов.

При очень больших мощностях картина чрезвычайно усложнялась. Вместо одного узкого канала возникало несколько, а иногда и множество таких нитей. Экспериментаторы ставили удивительные по тонкости замысла и исполнения опыты. Они наблюдали то, что никогда не пришло бы в голову ни Ньютону, ни Фарадею, ни Френелю — королям оптики. В те годы они и не помышляли о том, как глубок океан тайн света.

Но современных теоретиков все эти находки экспериментаторов не смутили. В нелинейных средах возможно и не такое. Теория убедительно показала, что уже на ранних стадиях фокусировки исходный пучок может распасться на несколько частей, тяготеющих к различным областям. В статьях замелькало магическое слово «неустойчивость». Действительно, из более точных уравнений следовало, что при очень больших мощностях пучки становятся неустойчивыми и стремятся распасться на отдельные нити. Казалось, все хорошо, но... что же все-таки происходило с пучками там, вблизи точек схлопывания?

Луговой не мог удовлетвориться общепринятым, основанным на опыте представлением о том, что там, безусловно, возникает узкий канал. Его не удовлетворяло это «безусловно», этот постулат, который нужно было принять на веру, как постулат о параллельности в геометрии Эвклида.

Свыше двух тысячелетий на этом постулате строилась геометрия, а затем и физика. До тех пор пока не нашлись люди, отказавшиеся принимать его на веру. Что будет, если отказаться от этого постулата, спросили они себя. Можно ли обойтись без него? Невозможно, ответила строгая математика.

Но, может быть, его можно заменить другим, упорствовали критиканы. Попробуйте,

соглашалась математика.

И они попробовали, Лобачевский и Риман. И создали две новые геометрии. Две неевклидовы геометрии. Они работали независимо и, конечно, случайно избрали различные из двух существующих возможностей — параллельные линии в бесконечности сходятся или параллельные линии в бесконечности расходятся. Оба варианта столь же правомочны, как постулат Эвклида.

Теперь неевклидова геометрия — полноправный отдел математики и надежный инструмент физики. Вселенная, изучаемая в огромных масштабах, не может быть описана при помощи евклидовой геометрии. Вблизи больших масс отклонения от нее заметны и при сравнительно малых расстояниях. Это установил автор теорий относительности Эйнштейн, а затем убедительно подтвердил опыт.

Но если даже чисто геометрический постулат может оказаться лишь особым, частным случаем, то как можно примириться с постулатом в физической теории!

И Луговой сообщает о своих сомнениях тому же семинару, перед которым за пять лет до этого Аскарьян выдвинул идею самофокусировки и самоканализации света. Он обращает внимание на то, что приближенные аналитические методы, основанные на предположении о неизменной форме пучка, не могут дать правильной картины за точкой схлопывания. Он показал, что при распространении интенсивного светового пучка в нелинейной среде его форма существенно изменяется.

Статья Лугового, содержащая эти соображения и результаты, появилась в журнале «Доклады Академии наук СССР» в 1967 году. Но во всех экспериментальных работах, продолжавших появляться до следующего года, сообщалось о том, что за точкой схлопывания пучка наблюдается волноводное распространение света в виде очень тонких ярких нитей.

Ответ машины

Только Прохоров поддержал своего молодого сотрудника. Он сам включился в эти исследования и привлек к ним А.Л. Дышко, специалистку по вычислительной математике. Раз приближенные аналитические методы оказались непригодными, пришлось призвать на помощь электронную вычислительную машину. Предстояла сложная трудоемкая работа.

Решили отказаться от каких-либо предвзятых предположений о судьбе пучка за точкой схлопывания. Машине были предложены уравнения, описывающие наиболее простую задачу: на плоскую границу вещества, о котором известно, что в нем наблюдается квадратичный эффект Керра, падает пучок света. Машина должна была определить, что будет происходить с ним по мере продвижения в глубь вещества.

Легко представить волнение, с которым исследователи ожидали результат, рождавшийся в электронных недрах вычислительной машины БЭСМ-6.

Проработав положенное время, машина сообщила: при этих условиях волноводного режима нет. За точкой схлопывания образуется некоторое число фокусов — областей с очень высокой концентрацией энергии и чрезвычайно малыми размерами.

Ответ в корне расходился не только со всеми вариантами существующих теорий, но и противоречил всем известным экспериментальным данным!

Было от чего прийти в уныние. Ведь они надеялись получить строгую и надежную картину перехода от постепенной самофокусировки через точку схлопывания к тонкой нити. Но ошибки не было. Уравнения верны, и машина работала правильно.

Тогда они предложили машине вторую задачу, точнее соответствующую условиям большинства опытов. Перед попаданием в нелинейную среду пучок света предварительно проходит собирающую линзу. Машина решила и эти уравнения.

Ответ был тем же. Никакой нити. Цепочка отдельных фокусов.

В чем же дело? Может, постановка задачи в чем-то не соответствует реальности?

Возможно, цепочка фокусов результат того, что из всего многообразия явлений при расчете учитывался только эффект Керра? Вполне вероятно и такое предположение — возникновение тонких нитей вызвано не эффектом Керра, а каким-то другим процессом.

Уравнения были усложнены. Теперь они отражали и действие вынужденного комбинационного рассеяния. Явления хорошо изученного, проявляющегося особенно сильно при больших интенсивностях света и известного как одна из причин самофокусировки.

Снова часы ожидания перед машиной. И новый ответ. Многофокусная структура должна существовать! Учет вынужденного комбинационного рассеяния приводит только к изменению численных величин. Узкого канала не возникает и в этом случае.

Казалось, оставался единственный путь. Перебирать один за другим все эффекты, способные привести к формированию тонких каналов. Записывать все новые, вероятно все более сложные, уравнения. И уповать на мощь БЭСМ-6. Возможно, что будет обнаружен эффект, ответственный за волноводное распространение света, за образование тонких, ярко светящихся нитей.

Нужна мощная интуиция для того, чтобы избрать другой путь. Отвергнуть очевидность многочисленных опытов. Отказаться от обаяния общепризнанных теорий. Сойти с проторенной тропы.

Прохоров и Луговой решили по-новому взглянуть на ответы машины. Не как на ошибку. Не как на результат неверного выбора исходных физических данных. А как на правильный вывод, соответствующий слишком упрощенно поставленной задаче. Ведь гигантский импульс лазера длится мгновение, точнее — десятки наносекунд, проще — сотые части от миллионной доли секунды. А они предлагали машине задачи, в которых пучки света действуют непрерывно с постоянной мощностью. И в зависимости от этой мощности получали различные расстояния до множества фокусов.

Вот где причина! Во время гигантской вспышки лазера мощность света меняется от нуля до огромной величины. Расстояния до фокусов не могут при этом быть постоянными. Они должны изменяться вместе с увеличением мощности. Фокусы должны перемещаться!

Бегущие фокусы?

Да, бегущие фокусы. Вот разгадка тайны. Может быть, они бегут так быстро, что и для глаза, и для приборов они сливаются в яркую непрерывную нить?

Новые сложные расчеты оправдали надежды. Да, конечно, фокусы движутся! При условиях, характерных для большинства экспериментов, выполненных в различных лабораториях, фокусы летят со скоростью, близкой к миллиарду сантиметров в секунду. Скорость, всего в тридцать раз меньшая, чем скорость света!

Не мудрено, что траектория их движения выглядит как яркая светящаяся нить.

Теперь слово опять должно быть предоставлено эксперименту. Но эксперименту, поставленному в полном соответствии с условиями, для которых Прохорову и его сотрудникам удалось сформулировать задачу и выполнить соответствующие расчеты.

Первое сообщение о том, что наблюдаемые сбоку тонкие световые нити представляют собой след движущихся фокусов, явилось плодом совместной работы сотрудника Прохорова В.В. Коробкина и А.И. Аллока, выполненной в США, где Коробкин работал в течение нескольких месяцев. Затем М.Т. Лой и И.Р. Шен сообщили, что в результате самых тщательных исследований, выполненных в соответствии с условиями теории Прохорова и его сотрудников, они не обнаружили волноводного распространения света, но наблюдали движущиеся фокусы. Наконец, Прохоров с возвратившимся домой Коробкиным, Р.В. Серовым и М.Я. Щелевым не только наблюдали движущиеся фокусы, но и измерили их скорость. Она хорошо совпадала с предсказаниями теории.

Казалось, достаточно. Но Прохоров и Луговой не прекратили работы. Вместе с А.А. Абрамовым они доказали, что не только гигантские импульсы, но и в тысячу раз более

короткие импульсы, те, которые принято называть сверхкороткими, тоже образуют движущиеся фокусы.

Подведем итоги. Твердо установлено теоретически и экспериментально, что мощный лазерный импульс, падающий на вещество, в котором возможен эффект Керра, самофокусируется. В результате возникает цепочка фокусов, чрезвычайно быстро движущихся по направлению к лазеру.

А как же тонкие нити? Как самоканализация света и его волноводное распространение, предсказанные Аскарьяном? Что делать с многочисленными теориями маститых авторов? Как относиться ко всем экспериментам, подтвердившим эти теории?

Не мне решать такие проблемы. Ведь факты — упрямая вещь. Но важно и толкование фактов.

Бегущие фокусы стали объективной реальностью. Они существуют, и условия их существования точно установлены.

Ясно и то, что теория волноводного распространения света еще не завершена. Слабые места ее известны. Не исключено, что и расчеты, аналогичные проведенным Дашко, Луговым и Прохоровым, выполненные для более сложных условий, соответствующих большинству прежних опытов, приведут к нитям или множеству нитей, а не к движущимся фокусам, соответствующим более простым условиям.

История еще не закончена. Невозможно предсказать, кто и где сделает следующий, решающий шаг. Но не сомневаюсь, что это будет человек или группа людей, столь же бестрепетно критикующих общепринятые теории, как Аскарьян и Луговой, обладающих чувством нового и глубокой интуицией Прохорова. Словом, то будут люди, не боящиеся идти против течения.

Глава VI. Качели

Лазер рождает лазер

Наши недостатки лишь продолжение наших достоинств. Как часто приходится сталкиваться с этим будничным вариантом великого закона противоположностей. Сфера действия его безгранична. А сила состоит в том, что в нем заключена возможность бесконечного развития. Ибо если достоинства неотделимы от недостатков, то и в недостатках заключены скрытые достоинства. Нужно лишь суметь обнаружить их и развить.

Все преимущества лазеров по сравнению с обычными источниками света обязаны тому, что в них неразрывно сочетаются квантовые свойства атомов, ионов или молекул с радиотехническим принципом обратной связи. Такое сочетание обеспечивает излучению лазера высокую упорядоченность в пространстве и во времени — высокую когерентность, говорят для краткости физики. Именно когерентность позволяет направлять все его излучение на маленькие площадки, размеры которых соизмеримы с длиной волны света. В его луче, сжатом до микронных размеров, плотность энергии столь велика, что ни одно из веществ не способно ему противостоять. Здесь бессильны представления старой оптики.

Когерентность дает лазерам возможность соперничать по стабильности с лучшими квантовыми стандартами частоты радиодиапазона. Но стабильность, неизменность его частоты, не всегда благо. Спектроскописты, химики, биологи, специалисты многих областей науки и техники мечтали о лазере, частоту которого можно было бы изменять, подобно тому как радист-оператор поворотом рукоятки заставляет свой передатчик работать на наиболее благоприятной частоте.

Многие говорят, что самая интересная часть современной оптики — нелинейная оптика. Это утверждение, вероятно, справедливо. Ведь нелинейная оптика стала общедоступной лишь с рождением лазеров, в то время как обычной линейной оптике не

менее трехсот, а может быть, и более двух тысяч лет. Трудно найти что-либо новое в почве, перелопаченной на такую глубину. Не мудрено, что все, о чем писалось до сих пор во второй части этой книги, так или иначе связано с нелинейной оптикой, оптикой предельно сконцентрированных световых полей.

В долазерную эру оптики имели дело лишь с крайне слабыми полями, и для наблюдения нелинейных явлений приходилось создавать очень чувствительную аппаратуру. Обсуждая эту ситуацию, академик Вавилов, введший в науку термин «нелинейная оптика», писал: «Физики настолько свыклись с линейностью обыденной оптики, что до сих пор нет даже формального строгого математического аппарата для решения реальных «нелинейных» оптических задач».

С появлением лазеров, особенно лазеров с управляемой добротностью резонатора, дающих гигантские импульсы света мощностью в миллиарды ватт, нелинейные явления приобретают большое, иногда решающее значение не только для физики, но и для технических применений. Кстати, именно член-корреспондент Академии наук СССР Рем Викторович Хохлов со своим сотрудником профессором Сергеем Александровичем Ахмановым написали первую монографию в этой области, суммировав и значительно развив в ней и теорию, и математический аппарат, который имел в виду Вавилов. Впрочем, во время работы над этой монографией они были на восемь лет моложе и не имели столь высоких ученых званий.

В предыдущих абзацах мы уже несколько раз применили выражение «нелинейные явления». Иногда совершенно невозможно избежать научных терминов. Однако специальные термины, в том числе и научные, вовсе не засоряют язык. Наоборот, они делают его проще, яснее и позволяют достичь краткости. Одно-два слова заменяют целую фразу, а иногда и несколько фраз.

Представим себе, например, график движения поезда, идущего с постоянной скоростью. Изображая путь, пройденный им за какое-нибудь время, мы получим прямую линию. Опуская слово «прямая», физик говорит о «линейном законе движения», имея в виду, что пройденный путь пропорционален времени. Если же график изображает путь, пройденный свободно падающим камнем, то мы увидим на нем не прямую, а изогнутую линию. Не вдаваясь в подробности, не уточняя истинной формы этой кривой, физик говорит, что она не прямолинейна. Для краткости он говорит: она нелинейна. Это значит, что путь, пройденный падающим камнем, не пропорционален времени, он связан со временем нелинейной зависимостью.

В воздухе, стекле, воде, в большинстве известных сред путь, пройденный светом, пропорционален времени. Значит, скорость света в таких средах постоянна. Для большинства веществ это верно при всех достижимых интенсивностях света, даже для лучей оптических квантовых генераторов. Но есть небольшое количество кристаллов, в которых скорость света меняется в зависимости от его силы. Более того, эта зависимость изменяется, если меняется направление света по отношению к ребрам кристалла и его граням. Такой закон распространения света естественно назвать нелинейным. Иногда слово «нелинейный» относят к самому кристаллу, имея в виду, что закон распространения света в кристалле отличен от линейного.

В радиотехнике давно применяют нелинейные зависимости тока от напряжения, наблюдающиеся в радиолампах и полупроводниковых приборах. Их используют, например, для умножения частоты. Это значит, что, имея ламповый генератор какой-то определенной частоты, можно, не меняя ничего в генераторе, получить колебания вдвое, или втрое, или даже вдесятеро большей частоты.

Естественно, что после создания оптических квантовых генераторов физики решили получить нечто подобное и в оптике. Ведь до сих пор мощные квантовые генераторы работают только на двух длинах волн — квантовые генераторы с ионами неодима дают инфракрасные волны длиной около одного микрона, и рубиновые генераторы с ионами хрома излучают красный свет длиной около 0,69 микрона. Между тем, удвоив частоту

неодимового генератора, то есть уменьшив его волну вдвое — до 0,5 микрона, можно получить зеленый свет. А утроить его частоту — значит получить ультрафиолетовые лучи длиной в 0,33 микрона. И не какие-нибудь лучи, а почти идеальные! Лазер рождает лазер!

Аналогичный результат дает умножение частоты рубинового генератора. Его вторая гармоника попадает в фиолетовую часть спектра, а третья дает жесткие ультрафиолетовые лучи.

Пропуская луч квантового генератора через специально выращенные кристаллы, Франкен и его сотрудники первыми смогли зарегистрировать появление излучения удвоенной частоты. Однако коэффициент преобразования был очень мал. Лишь ничтожная доля энергии падающей волны превращалась в энергию волны удвоенной частоты. Хохлов и его сотрудники глубоко проанализировали новое явление и поняли, что причина лежит в различии скоростей обеих волн. В результате, действия различных участков кристалла не складываются, а даже частично уничтожаются. Но уравнения подсказали Хохлову выход из положения. Оказывается, в кристалле можно найти направления, в которых падающая волна и волна с умноженной частотой бегут с такими скоростями, при которых все точки работают согласованно и результаты их действия складываются. При этом большая часть энергии падающей волны превращается в энергию волны с умноженной частотой. Так были созданы весьма эффективные оптические генераторы гармоник.

Гром с ясного неба

Перечитав предыдущий абзац, я увидела, что прошла мимо самого интересного. В нем все верно. Да, уравнения подсказали! Но, пока они не написаны, эта фраза лишена истинного смысла. А писать уравнения в такой вот научно-художественной книге не принято. Вернувшись еще немного назад, я прочитала: «в радиотехнике давно применяют...», «физики решили...» Как все просто звучит.

На деле все было весьма не просто. Радиотехника подсказала только цель. Сколько ни освещай лазером радиолампу, диод или транзистор, световой гармоники не получишь. Конечно, физики и не пытались сделать что-либо столь несуразное. Их защищало то, что обычно называют физической интуицией, а по существу — способность применять предыдущий опыт в новых ситуациях. Эта способность вытекает из глубокой общности законов природы и из единства математических методов описания природы. В данном случае речь идет о нелинейной теории колебаний, разработанной главным образом учеными из школ Мандельштама и Папалекси, Крылова и Боголюбова. Заметим, кстати, что Хохлов и Ахманов принадлежат к третьему поколению школы Мандельштама — Папалекси, о которой нам уже не раз приходилось упоминать.

Нелинейные явления в волновых процессах уже давно встречались акустикам. Теперь они доставляют неприятности каждому из нас громopodobными звуками, возникающими всякий раз, когда самолет преодолевает звуковой барьер. Дело в том, что звук — волна сжатия и разрежения воздуха. Пока звук слаб, он бежит в воздухе без искажения. Только это позволяет нам разговаривать и наслаждаться музыкой. Но если звук слишком силен...

Там где воздух сжат, скорость звука больше, чем в местах разрежения. Поэтому отдельные участки сильной звуковой волны нагоняют другие ее участки. Плавные звуковые волны искажаются. В них возникают крутые фронты, подобные нарастающим отвесным гребням прибоя, все увеличивающимся по мере набегания морских волн на прибрежную отмель. Такие искаженные и все нарастающие фронты звуковых волн, бегущие в воздухе много быстрее, чем обычные звуки, и есть то, чем тревожит нас сверхзвуковая авиация.

Самым важным из всего сказанного было для оптиков то, что самолет, летящий быстрее звука, не возбуждает ударной волны, так же как не появляется она при дозвуковой скорости. Она возникает только, когда скорость самолета близка к скорости звука. Только при таких условиях звук, возбуждаемый летящим самолетом в течение многих периодов

звуковой волны, усиливает ее все больше и больше. При этом почти вся энергия двигателей самолета перекачивается в энергию звуковых волн. Двигатели должны иметь большой запас мощности, чтобы оторвать самолет от высасывающих энергию сопутствующих звуковых волн, прорвать звуковой барьер, обогнать жадные волны, уничтожить синхронизм, вследствие которого самолет вынужден тащить на себе массы воздуха, превращающиеся для него в тяжелые путы.

Если бы, не стремясь к скорости, летчик захотел уподобить свой самолет гроыхающей колеснице Ильи-пророка, ему пришлось бы лететь точно со скоростью звука.

Именно такую цель ставили перед собой физики: фаза луча лазера должна бежать в веществе точно с той же скоростью, как и фаза порождаемой им волны второй или третьей, а иногда и более высокой гармонике. Здесь приходится применить слово «фаза», для того чтобы не вызвать неудовольствия тех, кто уже привык к этому слову. Те же, кто предпочитает обходиться без него, вполне могут продолжать думать о волне как таковой, имея в виду гребень простой волны, форма которой совпадает с известной каждому школьнику синусоидой.

Задача обеспечения равенства скорости перемещения фаз — фазового синхронизма — осложняется наличием дисперсии, обнаруженной еще Декартом и подробно изученной Ньютоном. Дисперсия проявляется в том, что во всех реальных средах скорость света зависит от его частоты, а значит, от длины соответствующей волны. Наличие дисперсии привело Ньютона к выводу о неизбежности оптических искажений, он назвал их хроматической абберацией, в линзовых телескопах. Ошибочный вывод заставил Ньютона перейти к зеркальным телескопам.

Наличие дисперсии, казалось, делает невозможным эффективное умножение частоты света. Действительно, в обычных прозрачных средах, например в газах, жидкостях и стеклах, скорость света уменьшается при увеличении частоты. Значит, в этих средах фазы двух волн, частоты которых различаются вдвое или втрое, не могут бежать с одинаковой скоростью. А следовательно, синхронизм, необходимый для успешной перекачки энергии падающей волны в энергию гармонике, невозможен. Так в нелинейной оптике при первой попытке ее практического применения возник тупик.

История повторяется, но, к счастью, не всегда применимо знаменитое замечание Маркса о том, что в первый раз это трагедия, во второй — фарс. Ошибка Ньютона была вскрыта замечательным математиком Эйлером, который теоретически вывел возможность исключения хроматической абберации линз. Ему не удалось воплотить это на практике, но английский оптик Диллонд, затратив несколько лет на упорные поиски, создал сложную линзу, объединяющую в себе две линзы, изготовленные из различных сортов стекла с разными законами дисперсии, и, таким образом, добился того, что искажения в одной из них уничтожают искажения в другой. Так в результате взаимной компенсации получается неискаженное изображение. Теперь объективы всех телескопов, биноклей и подзорных труб делаются именно таким способом.

Радуга в кристалле

Сходным путем удалось найти и выход из тупика, в который зашла нелинейная оптика. Американские физики Джордмэйн и Терхьюн обратили внимание на то, что условие синхронизма может быть выполнено в двоякопреломляющих кристаллах. Двойное лучепреломление было, как известно, открыто чуть более трехсот лет назад Эразмом Бартолином. Он обнаружил, что луч света, попадая на поверхность кристалла исландского шпата, раздваивается, причем каждая из его частей преломляется по-разному. Одна из них подчиняется закону преломления, найденному Декартом, а другая — нет.

Был бы факт, а объяснение найдется. Так, наверное, говорили и во времена Бартолина, и он нашел объяснение. Бартолин счел, что в кристалле исландского шпата есть поры,

которые захватывают второй луч (Бартолин назвал его подвижным) и не дают ему подчиняться закону. Правда, обнаружить эти поры не удавалось, но ведь и другого объяснения тоже не находилось. Даже великий Ньютон не мог сказать здесь ничего определенного. Он начал свою фундаментальную «Оптику» гордым отказом от гипотез:

«Мое намерение в этой книге не объяснять свойства света гипотезами, но изложить их и доказать рассуждением и опытами».

Но, дойдя до догадки Бартолина, он был вынужден ввести гипотезу о том, что световые корпускулы обладают двумя сторонами и их преломление зависит от того, какой стороной они ударяются. Почему это проявляется лишь при ударе о кристалл исландского шпата, а в других случаях нет, так и осталось необъясненным.

Правда, в том же году, когда появилась в свет «Оптика» Ньютона, Гюйгенс сумел объяснить появление двух волн тем, что в исландском шпате, он называет его исландским кристаллом, существуют две скорости света. И Гюйгенс вынужден ввести гипотезу о том, что в кристалле имеются две различные материи, которые служат «обоим видам преломления». Но Гюйгенс чувствует неполноту своего объяснения и, «оставляя другим исследование этого вопроса», переходит к обсуждению необыкновенной формы кристалла. Только Френель, нашедший в себе смелость признать свет поперечными волнами, смог непротиворечиво объяснить явления поляризации.

Однако вернемся к Терхьюну. Он показал, что в двоякопреломляющих кристаллах условие синхронизма может быть выполнено, если использовать две волны, имеющих различную поляризацию.

Если в опытах Франкена в отсутствие синхронизма даже мощный лазерный импульс возбуждал лишь слабую волну второй гармоники, то наличие синхронизма полностью изменило ситуацию. Дело в том, что волновой синхронизм приводит к накоплению энергии в волне второй гармоники. Поэтому даже излучение маломощного гелий-неонового лазера позволяет в этих условиях получить заметный результат.

Стой, вправе сказать читатель. Раз наличие синхронизма позволяет применять маломощные источники света, то нельзя ли получить умножение частоты обычных источников света? Логика подсказывает положительный ответ. Но физика приводит к отрицательному.

Дело в том, что точный синхронизм осуществляется лишь вдоль одного фиксированного направления в кристалле. Чуть вбок, и эффект накопления исчезает. А не лазерные источники дают лишь расходящиеся пучки. Мощность, идущая в таких пучках строго вдоль какой-либо прямой, практически равна нулю. Значит, равна нулю и мощность гармоники. Положение ухудшается и тем, что направление синхронизма сильно зависит от частоты света, а обычные источники дают много более широкополосный свет, чем лазеры. В результате энергия, идущая в избранном направлении в кристалле от не лазерного источника, уменьшается еще сильнее.

Умножение частоты излучения лазеров позволяет существенно обогатить палитру когерентного света. Однако так не удастся добиться плавной перестройки частоты, плавного изменения цвета лазерного излучения.

Такая возможность была найдена Хохловым и Ахмановым. Они использовали только что упомянутый факт зависимости направления синхронизма в кристалле от частоты и метод параметрической генерации, разработанный для радиодиапазона Мандельштамом и Папалекси на основе нелинейной теории колебаний.

Качели

Вещи и явления, привычные с детства, кажутся сами собой разумеющимися. Но мы

вступаем в юность, пору сомнений, и к детству вместе с прилагательным «счастливое» присоединяется совсем неприятное — «глупое».

Познакомившись с законами Ньютона, мы уже не можем понять, как удается качаться на качелях. Качели бросают вызов ньютоновским законам. Возможно, триста лет назад в Англии не знали этого развлечения. Иначе трудно понять, как острый ум Ньютона прошел мимо такого парадокса. Ведь внутренние силы не способны сместить центр инерции! Так возникает отдача при выстреле. Ракета движется вперед только потому, что газы с огромной скоростью вылетают из ее сопла назад. Центр тяжести ракеты, определенный перед ее стартом, навсегда остается на стартовом столе. И раз ракета летит, то качели должны оставаться неподвижными... если в природе не существует нечего, неизвестное Ньютону.

Дети обнаруживают это «нечто», еще не осознав значения слов «наука» и «физика». Они залезают на качели и, ритмично сгибая и распрямляя колени, раскачиваются все сильнее. До тех пор, пока позволяют силы или мужество. Это удается им потому, что дети нетерпеливы, они начинают раскачиваться сразу же, как только им удастся забраться на качели. Только один раз я видела горе вихрастой кокетки, которая, вспрыгнув на перекладину, долго дразнила своих маленьких поклонников, а потом никак не могла раскачаться, сколько ни приседала. Она всячески извивалась и даже подпрыгивала, но тщетно. Ей мешал закон Ньютона. И только после того, как ее рыцарь дал ей легкий толчок, дело пошло на лад.

Качели — маятник. Их необходимо толкнуть, иначе они останутся неподвижными. Такова природа. Но когда они уже хоть немного качаются, природа не препятствует желанию маленькой девочки раскачать их сильнее. Стоит лишь уловить ритм и присесть, а затем распрямляться в нужные моменты. Если она приседает, когда качели находятся в высшей точке, и распрямляется, когда они быстро проскакивают через низшее положение, размахи будут увеличиваться. Собьешься с ритма, и волшебное чувство полета исчезнет.

Раскачивая свою подругу, пассивно сидящую на качелях, кавалер не должен задумываться. Но потребовались века для того, чтобы понять, как она раскачивается сама. Физики называют этот процесс параметрическим возбуждением колебаний. Основной параметр маятника (и, конечно, качелей) — длина подвеса. Она определяет период колебаний. Период длинного маятника больше, чем период короткого. Длину подвеса нужно отсчитывать от точки подвеса до центра тяжести груза. В случае качелей центр тяжести находится где-то вблизи талии качающегося.

Сгибая и разгибая колени, человек меняет положение центра тяжести, а значит, и длину подвеса. Распрямляясь, он совершает работу против сил тяжести. Расслабляя мышцы, он позволяет силе тяжести согнуть его колени. Когда качели неподвижны, это ничего не дает. Если длина подвеса постоянна, то тоже нет другого способа раскачать качели, как толкать их со стороны.

Иное дело, если качели уже хотя бы немного движутся. Распрямляясь в нижней точке, человек совершает работу не только против силы тяжести, но и против центробежной силы. В верхней точке, когда качели на мгновение остаются неподвижными, центробежная сила исчезает, и его колени сгибает только сила тяжести. Работа человека на движущихся качелях больше, чем на неподвижных.

Теперь ясно, откуда берется энергия, необходимая для раскачивания качелей. Но остался нерешенным главный вопрос. Как они раскачиваются? Ведь сила человека, распрямляющего колени, направлена вертикально, а прирост его скорости в этот момент направлен горизонтально, поперек направления силы.

Парадокс возникает потому, что, пытаясь применить законы Ньютона к реальным качелям, мы продолжаем думать о них как об идеальном маятнике с подвесом неизменной длины. Физик скажет как о системе с одной степенью свободы, имея в виду, что у идеального маятника может изменяться только одна характеристика — угол между подвесом и отвесом. Отвес здесь, конечно, призван лишь обозначать вертикальную линию.

Но мы уже заметили — у реальных качелей меняется и длина подвеса. То, что было у

идеального маятника неизменным параметром, стало для качелей второй степенью свободы. При этом существенно, что в случае качелей обе степени свободы связаны между собой. Они могут обмениваться энергией. Энергия, затрачиваемая человеком на изменение длины подвеса, может превращаться в энергию обычных колебаний качелей. Важно лишь, чтобы человек работал. Если же он будет распрямляться, взлетая вверх, и сгибать колени в низшей точке, то он будет лишь отбирать энергию у раскачивающихся качелей и погасит их колебания.

Сказанное звучит не очень убедительно, не очень логично с точки зрения здравого смысла. Но с такой точки зрения абсурдно и утверждение физика о том, что атлет, держащий над головой тяжелую штангу, не совершает работы.

Здравый смысл в этом простейшем случае должен умерить свои амбиции. Физик прав, механическая работа отлична от нуля, только если сила действует на каком-либо пути. Если же движения нет, путь равен нулю, равна нулю и механическая работа. Конечно, фиксируя штангу над головой, атлет тратит огромную энергию. Но она не передается штанге. Вся она уходит на нагрев мышц, отдельные волокна которых поочередно сокращаются и расслабляются. Механизм параметрического возбуждения колебаний маятников и струн понял уже знаменитый лорд Рэлей. Мандельштам и Папалекси распространили этот принцип на все колебательные системы и, осознав его всеобщность, нашли новый путь возбуждения электрических колебаний, новый способ получения электрической энергии, новый тип электрического двигателя.

Электрические качели

Главный способ получения электрической энергии и в наши дни основан на применении вращающихся генераторов — динамо, как их называли раньше. Таким путем получается электроэнергия не только на обычных тепловых электростанциях и гидростанциях, где генераторы приводятся в движение паром или текущей водой, но и на всех действующих атомных электростанциях. Остальные способы, как, впрочем, и метод параметрической генерации, имеют пока вспомогательное значение. Но для нас последний способ очень важен, ибо он привел ученых к новому типу лазера.

Способ очень прост. Он использует свойства обычного колебательного контура, являющегося электрическим эквивалентом качелей. Простейший контур состоит из электрического конденсатора — две металлические пластинки, разделенные воздушным промежутком, — и проволочной катушки. Если на пластинах конденсатора появятся электрические заряды, положительный на одной и отрицательный на другой, то по катушке потечет ток. Заряды исчезнут, но ток будет продолжаться, пока на пластинах не появятся точно такие же заряды, но противоположного знака. Там, где был плюс, появится минус, и наоборот. Затем все повторится в обратном направлении, и повторилось бы сколь угодно долго, если бы часть энергии не тратилась на нагрев проводов. Постепенно весь запас энергии превратится в тепло, и колебания прекратятся.

Но вспомним о качелях. Будем раздвигать пластины конденсатора каждый раз, когда заряд на нем достигнет наибольшей величины, и возвращать их обратно, когда заряд равен нулю. Придется два раза за период совершать работу против сил притяжения разноименных зарядов. В результате напряжение на конденсаторе каждый раз будет немного увеличиваться, и энергия электрических колебаний станет возрастать за счет механической работы. Так работает параметрический генератор. В реальных условиях энергия электрических колебаний не будет возрастать бесконечно, а лишь до тех пор, пока не установится баланс между механической работой, затрачиваемой на перемещение пластин конденсатора, и нагревом проводов. Конечно, может найтись и полезное применение получающейся при этом электрической энергии.

Лазерные качели

Общая теория колебаний позволяет, исходя из всего, что изучено в области механических и электрических колебаний, предвидеть аналогичные явления в других областях, в частности в оптике.

Наряду с умножением частоты света теория предсказывает возникновение при известных условиях света с частотой более низкой, чем частота возбуждающего лазерного света. Такие условия возникают, в частности, в некоторых кристаллах, в которых зеленое излучение аргонового лазера возбуждает желтые, красные и даже инфракрасные волны. Характерно, что каждая из волн распространяется только по вполне определенным направлениям. Эти направления определяются условиями синхронизма, о которых уже говорилось в связи с умножением частоты света в подобных кристаллах. В отличие от случая параметрического возбуждения колебаний маятников и электрических контуров, при котором интенсивность колебаний увеличивается со временем, здесь, в оптике, колебания усиливаются по мере продвижения волны в глубь кристалла, причем усиление тем сильнее, чем больше расстояние, на котором сохраняются условия синхронизма.

До сих пор мы не видели никаких путей к плавному изменению длины волны лазерного излучения. Для достижения этой заветной цели необходимо найти в кристаллах возможность возникновения более сложных условий синхронизма, связывающих между собой не две, а три световых волны. И здесь Хохлов и Ахманов исходили из радиотехнической аналогии. Выше, при обсуждении процесса параметрической генерации, говорилось лишь о генерации дробных гармоник с частотами, равными половине, трети и другим долям частоты возбуждающего колебания. Но если вместо простого колебательного контура применить систему из двух связанных контуров, то возможности сразу расширятся.

Если контуры настроены так, что сумма их резонансных частот равна частоте внешнего возбуждающего сигнала, то сигнал возбудит параметрические колебания сразу в обоих контурах. Частота каждого из контуров уже не должна быть строго фиксирована. Их можно перестраивать. Нужно соблюдать лишь одно условие; сумма их резонансных частот должна оставаться постоянной и равной частоте внешнего сигнала.

Хохлов и Ахманов понимали, что в оптике этого недостаточно. Кроме условия о сумме частот возбуждаемых колебаний, должно быть выполнено еще одно важное условие. Направления распространения всех трех волн тоже оказываются связанными между собой и с соответствующими длинами волн так, что они должны образовывать треугольник, стороны которого обратно пропорциональны соответствующей длине волны.

Казалось, что новое условие делает невозможным обеспечение волнового синхронизма, а вместе с тем делает недостижимым эффективное преобразование энергии возбуждающей волны в энергию двух возбуждаемых волн. Однако Хохлов и Ахманов заметили, что во многих кристаллах такое условие может быть выполнено. Более того, при повороте кристалла по отношению к направлению распространения волны лазера условия синхронизма выполняются для различных частот. Это и есть простейший способ перестройки частоты нового прибора, который авторы назвали параметрическим лазером.

Выходная мощность параметрического лазера пропорциональна мощности возбуждающего излучения и очень быстро увеличивается с длиной кристалла. Но и тот и другой путь ограничены. Чрезмерная мощность возбуждающего излучения, если ее даже удастся получить, разрушит кристалл. Сильно увеличивать длину кристалла трудно, ибо сложность и стоимость выращивания больших однородных кристаллов возрастают много быстрее, чем размеры получаемого кристалла.

Хохлов и Ахманов избежали этих трудностей, поместив кристалл в оптический резонатор, состоящий из двух плоских зеркал, как в обычных лазерах. Волны, возбуждаемые в кристалле в результате параметрического взаимодействия, отражаются от зеркал и многократно пробегают вдоль него, причем интенсивность их каждый раз существенно

увеличивается.

Сейчас параметрические лазеры позволяют плавно перекрыть диапазон частот, включающий видимый свет и значительную часть инфракрасного диапазона. Они получили широкое применение и в спектральных исследованиях, и в изучении биологических и химических процессов. Нелинейные кристаллы могут служить и своеобразными оптическими микрофонами. При их помощи можно модулировать световые волны так же, как при помощи микрофонов модулируют радиоволны для передачи музыки или речи.

Особое практическое значение приобрело в последнее время явление управляемой оптической рефракции. Атмосферная рефракция, искривляющая путь лучей в воздухе, была обнаружена, как известно, еще Птолемеем. Ее приходится учитывать и при работе радиолокационных станций. Рефракция проявляется в любых средах, если их показатель преломления не всюду одинаков. «Стеклянные сучки» — свили в оконных стеклах, искажающие проходящий через них свет, вызваны именно нарушением оптической однородности стекла.

В веществах, показатель преломления которых сильно зависит от приложенного электрического напряжения, можно вызвать появление искусственной рефракции и таким путем изменять направление лучей света, проходящих через вещество. Такие приспособления применяются, в частности, в некоторых системах крупно-экранного телевидения и в некоторых типах оптических локаторов.

Нелинейные оптические явления — та область, где отчетливо проявляется неразделимое единство двойственной природы света. Все, что только что говорилось об умножении частоты света, выражалось при помощи привычных для радистов волновых понятий. Но все это можно выразить и иначе.

Вчера и завтра

С квантовой точки зрения удвоение частоты выглядит так. Кристалл, обладающий нелинейными свойствами, превращает два кванта малой энергии (два кванта инфракрасного излучения) в один квант вдвое большей энергии (квант зеленого света).

Соответственно параметрическое возбуждение света представляет собой распад возбуждающего фотона на два вторичных фотона, причем их суммарная энергия равна его энергии, а их суммарный импульс его первоначальному импульсу.

Нелинейная оптика предсказывает большую роль других процессов, в которых участвует сразу по несколько фотонов. Красная граница фотоэффекта, послужившая Эйнштейну исходным пунктом для создания квантовой теории света, теряет свое значение при больших интенсивностях излучения, обеспечиваемых лазерами. В лазерном луче фотоны летят «так густо», что два или даже несколько фотонов могут одновременно отдать свою энергию одному электрону и выбросить его сквозь энергетический барьер, высота которого образует непреодолимое препятствие для одиночного фотона данной частоты.

Это же относится к ионизации. Обычно фотоны поодиночке участвуют в процессах возбуждения и ионизации атомов. Н. Делоне в лаборатории Физического института имени Лебедева, руководимой М. Рабиновичем, изучал многофотонную ионизацию инертных газов и наблюдал акты ионизации, в которых одновременно участвовало одиннадцать фотонов.

Может быть, еще интереснее процессы, в которых участвуют не только несколько фотонов, но и кванты звука — фононы.

Один из таких процессов — рассеяние света на тепловых волнах, рассеяние Мандельштама — Бриллюэна. С квантовой точки зрения, здесь все очень просто. Ведь звуковая волна может рассматриваться как поток квантов звука — фононов, — совершенно так же, как световая волна может быть представлена потоком квантов света — фотонов. Выбор того или иного представления зависит от характера рассматриваемого явления. В одних явлениях явно выступают волновые свойства, в других преобладают квантовые.

В квантовой трактовке рассеяние Манделъштама — Бриллюэна сводится к столкновению фотона и фонона. Фотон исчезает, и одновременно рождается новый, имеющий другую частоту, меньшую, если при этом рождается и фонон, и большую, если фонон тоже исчезает. В таком процессе преобразуются не только энергии, но и импульсы взаимодействующих частиц: импульс вторичного фотона равен сумме импульсов первичного фотона и фонона, принимавшего участие в процессе.

Если же интенсивность падающего света очень велика, что легко достигается при помощи импульсных лазеров, то картина рассеяния Манделъштама — Бриллюэна резко меняется. При малой интенсивности света рассеяние пропорционально числу фононов. При большой — число фононов резко возрастает за счет рождения новых фононов в процессе рассеяния. В результате быстро увеличивается и само рассеяние. Так возникает фотонно-фононная лавина. Такой процесс называется вынужденным манделъштам-бриллюэновским рассеянием. Фононная лавина может, как показали Прохоров и Бункин, вызвать разрушение материала, в котором происходит такой процесс. Так может произойти и саморазрушение лазера, ибо вынужденное манделъштам-бриллюэновское рассеяние происходит и в активных элементах лазеров.

Многочастичным процессом с участием двух фотонов и фононов является и комбинационное рассеяние, открытое в 1928 году Манделъштамом и Ландсбергом в Москве и Раманом и Кришнаном в Калькутте. Оно отличается от предыдущего тем, что фотоны, участвующие в нем, связаны не с тепловыми колебаниями среды как целого, не с тепловыми волнами, а с внутримолекулярными колебаниями.

При лазерных интенсивностях света может наблюдаться вынужденное комбинационное рассеяние, при котором так же резко возрастает интенсивность рассеянного света. На этой основе удалось создать новый специальный тип лазера, позволяющий получить чрезвычайно большую яркость когерентного света.

Нелинейная оптика — одно из молодых направлений древней науки. У нее уже много достижений, но еще большего следует ожидать в будущем.

Глава VII. Образы

На Неве

Приходилось ли вам ясным весенним утром смотреть на Неву, стоя на крыльце здания Адмиралтейства? Тяжелая громада Петропавловской крепости сумрачно глядит на вычурные линии Зимнего дворца. Строгий стиль бывшего здания биржи контрастирует с двумя роstralными колоннами, которые напоминают о тех далеких временах, когда парус, а не пар и тем более не атомное ядро служили покорителям морей и океанов. Трудно пройти мимо, не задержавшись взглядом на силуэте прошлого. Но человек устроен так, что, вспоминая о старом, он стремится к новому.

Солнечным утром в конце 50-х годов по мосту шагал молодой человек. Шагал, не глядя по сторонам, не замечая окружающего. Он спешил на работу, и его работа шла с ним. Вечером она сопровождала его домой, и усаживала за письменный стол, и не пускала ни в театр, ни в кино. И допоздна не давала уснуть. А утром, когда он просыпался, бодрый и полный энергии, она была тут как тут, и торопила его, и подгоняла новыми надеждами.

И он торопился по набережной, не глядя по сторонам и не замечая плоского здания петровской кунсткамеры и высокого крыльца университета. Так же безразлично он сворачивал с набережной направо между палисадниками и, не видя ни изумрудной зелени, ни возникавшего вдали массивного здания библиотеки, еще раз обдумывал то, что должен сделать сегодня.

Он заходил в институт, одно из первых научных учреждений, созданных Советским

правительством, и, пройдя длинными коридорами, открывал дверь в лабораторию и зажигал свет. Окна в лаборатории обычно были наглухо закрыты черными шторами. Молодой человек работал над одной из старых проблем оптики. Свет здесь тоже был работником. Незаменимым, но своевольным, и его нужно было держать в руках, управлять им, как опытный наездник управляет горячей лошастью.

В этом институте живы и развиваются традиции замечательных оптиков С.И. Вавилова, Д.А. Рождественского и других ученых, посвятивших свою жизнь изучению свойств света и применению оптических явлений на пользу людям. Здесь чтят и уважают тех, кто отдает науке все время, все силы, мысли и мечты. Тут, на Васильевском острове, не только территориально, но и идейно слились, неразрывно переплелись три рукава науки — академическая, университетская и отраслевая. Объединились далекими перспективами, конкретными задачами и, самое главное, людьми, умеющими широко мыслить, дерзко провидеть будущее, упорно идти к поставленной цели.

Задача, над которой бился Юрий Николаевич Денисюк, казалась неинтересной большинству его коллег. Человечество вступило в космическую эру. Стали реальностью атомные электростанции. А его, видите ли, не удовлетворяют возможности фотографии!

Уже получены изображения огромных галактик и мельчайших вирусов. Даже отдельные молекулы зафиксированы на фотопластинках. А миллионы самых разнообразных фотоаппаратов в руках любителей и профессионалов превратили фотографию в подлинное искусство, отображающее окружающий мир во всем его многообразии. Что же еще надо?

Да, соглашались друзья, конечно, фотография не лишена недостатков. Она плоска, она мертва. Но настоящий мастер способен, несмотря на это, добиться чудесных результатов при помощи обычного фотоаппарата. А ведь существует и кино.

Есть множество более насущных или более интересных задач. Нельзя забывать и того, что над усовершенствованием фотографии трудилось множество людей, среди них и глубокие ученые, и талантливые инженеры. Здесь каждый новый шаг требует огромных усилий. Окупятся ли они?

Но Денисюк ясно понимал, что блестящие достижения фотографии заслоняют ее принципиальное несовершенство. Она способна зафиксировать на фотоэмульсии лишь ничтожную часть сведений об объекте съемки, переносимых световыми волнами. Этот порок не устранен и в кино. Огромный поток информации остается неиспользованным. Найти возможность применения всей теряемой информации — не мелочь. Сделавший такое совершит важный шаг, все последствия которого трудно предвидеть!

Табула раса

Свет солнца, вольтовой дуги или другого источника света в каком-то смысле похож на чистый лист бумаги. В самом деле, рассматривая бумагу через лупу или микроскоп, можно узнать много интересного о ее строении. Но это нужно только специалистам. Большинство людей применяет бумагу для письма, для рисования. Став основой книгопечатания, бумага привела к интеллектуальной революции. Бумага уже много веков служит основным носителем информации, текущей по номерам газет и журналов, застывающей на многие годы и века на листах книг и законодательных актов. Конечно, бумага имеет и чисто технические применения. Но и в этом она подобна свету.

Изучая особенности световых лучей, можно узнать многое. Астроному они говорят о строении далеких звезд, сталевару о ходе плавки, их применяют и в технологических целях. Для человечества свет — зеркало, в котором отражен весь окружающий нас мир. Оно собирает всю информацию о мире.

И для человека и для животного самая важная функция, выполняемая светом, — передача информации. Природа в процессе эволюции выработала наиболее сложный и совершенный из органов чувств — глаз. Чем были бы мы без зрения!

Свет, отраженный предметами внешнего мира, несет в себе богатейшую информацию. Глаз воспринимает этот свет и передает полученную информацию в мозг. Здесь-то и возникает представление о внешнем мире. Примитивное у животных, все более полное у человека. Глаз и мозг — вот основной канал, при помощи которого мы связаны с внешним миром и можем отображать его в нашем сознании.

Виктор Обухов был близорук. Стоило ему снять очки, как все расплывалось перед его глазами. Виктор уже оканчивал университет, а впервые ему пришлось надеть очки при поступлении в школу. Но и теперь он воспринимал пару копеечных стекол как чудо. Сквозь них ему открывается вся прелесть мира.

Конечно, еще в школе он умел на уроках физики объяснить, что хрусталики его глаз имеют слишком выпуклую форму и не могут создать на сетчатке резкого изображения. А вогнутые линзы очков помогают это сделать, и он знал, что дальнозорким, хрусталики которых слишком плоски, нужно носить выпуклые линзы, и тогда ослабевшие мышцы глаз могут справиться со своей задачей.

Все было просто и понятно школьнику Вите. Но студент Обухов чувствовал правоту аспиранта Денисюка, утверждавшего, что лишь при поверхностном наблюдении сложное кажется простым.

Да, да, поспешно соглашался Виктор, действительно, человек лишится счастья, а человечество прогресса, если простота и ясность детства не будут разрушаться под напором жизни.

Денисюк не стал бы тратить время на объяснение очевидного, но собеседник, вернее слушатель, необходим, чтобы отточить аргументы, и Денисюк старался сформулировать свои мысли логично и ясно.

Итак, свет, рассеянный каждым телом, несет полную информацию о нем. Далее, ни глаз Виктора, ни фотоаппарат не способны зафиксировать и малой доли этой информации. Не так ли?

Ну конечно! Как мог Виктор возразить? Стоит ему снять очки, и он становится совершенно беспомощным. Он видит свет, но не воспринимает ничего определенного. Если на сетчатке нет изображения, мозг бессилен. Он не способен извлечь что-либо определенное из информации, которая по-прежнему вливается в зрачки глаз, но, не будучи упорядоченной хрусталиком, образует на сетчатке световую кашу. Виктор в особенно тяжелом положении. У него неполноценные глаза. Людям с нормальным зрением легче. Они могут без малейшего напряжения переводить взгляд с ближних предметов на дальние и видеть все четко и ясно. Кривизна хрусталика изменяется рефлекторно, когда наше внимание переходит с одного предмета на другой. Глаз с нарушенными функциями этого сделать не может. Не может и фотоаппарат.

В фотоаппарате, где кривизна линз объектива неизменна, резкость изображения достигается изменением расстояния от объектива до эмульсии. Сбей наводку, и на пластинке не возникнет никакого изображения. Такая же каша, как у близорукого, лишенного очков. Вот это досадное свойство глаза и фотоаппарата и подчеркивал Денисюк. Изображение, образуемое линзой, содержит очень малую часть образа реальных предметов. Из всего необъятного пространства точно отображается лишь одна плоскость. Все, что вне ее, ближе или дальше, получается не резко. И чем больше расстояние от избранной плоскости, тем меньше резкость изображения. Не так ли?

Перспектива

Виктор почтительно воспринимал безупречную логику рассуждений Денисюка. Он часами рассматривал фотографию шмеля, полученную при помощи телеобъектива. Ясно видны мельчайшие ворсинки на его лайках, лепесток цветка, на котором он сидит, но все остальное расплывалось в неопределенный серый фон.

Что находилось там, когда был сделан снимок? Этого никто и никогда не узнает, хотя лучи света, несомненно, пронесли все сведения через объектив фотоаппарата. Но объектив, как бы истратив полностью свои возможности на прекрасное изображение малой части картины, навсегда погубил остальное.

Так можно ли фиксировать всю информацию, переносимую светом, и как? Над этим и думал Юрий Николаевич Денисюк.

Основное, что мы теряем, применяя для создания изображения линзы, — объемность. Недаром бытует выражение — «плоский, как фотография». Как тут не вспомнить традиционную японскую живопись. В ее традициях особенно проглядывает упорство, с которым художники стремились преодолеть пространство. Удаленные предметы на такой картине расположены над близкими. Близкие не заслоняют их. Прозрачные пастельные тона и смазанные контуры настолько соответствуют мягким горным пейзажам, что глаз не обращает внимания на главную особенность этой живописи. Но лишь только на картине возникают изделия рук человека с их четкими контурами или, помимо удаленных ландшафтов, появляется передний план, вспоминаются детские рисунки. Они плоски! Лишь живое воображение ребенка или воспитанная многими поколениями привычка позволяет, отвлекаясь от примитивной формы, домысливать телесную объемность реального мира. Дети быстро проходят путь, на который человечество затратило века. Они удивительно рано научаются переносить на бумагу изображение реального мира. Рельсы, уходя вдаль, сближаются. Телеграфные столбы становятся меньше и меньше. Лишь впоследствии дети узнают, что это называется перспективой.

Рисунок и живопись, лишённые перспективы, бесперспективны. Этот горький каламбур относится в равной степени и к абстрактной живописи, и к некоторым другим авангардистским течениям. Порывы ветра всегда вызывают рябь на поверхности воды. Создается полная иллюзия течения. Но ему не хватает глубины.

Прогресс подобен мощной реке. Он движется своим путем, несмотря на капризные дуновения и даже бури, способные на время задержать его извечный ход.

Перспектива органически свойственна фотографии. Законы оптики, управляющие прохождением света через объектив, переносят на фотоэмульсию изображение внешнего мира в полном соответствии с требованиями перспективы. Удаленный предмет получается меньшим, чем такой же самый, но более близкий. Более того, на фотографии ближние предметы заслоняют то, что находится за ними. Все это позволяет в какой-то мере судить о расстояниях. Но то еще не истинная объемность. Так мы видим, закрыв один глаз.

Виктор переводил взгляд с фотографии шмеля на репродукцию старинного японского пейзажа, задумчиво теребил дужку своих очков.

Объемное зрение, думал Виктор, результат взаимодействия физики и физиологии. Сама физика здесь бессильна. Не слишком ли многого хочет аспирант?

Ведь любой человек знает, зачем у нас два глаза. Каждый из них видит со своей точки зрения. Немного справа и немного слева. И мы не отдаем себе отчета в том, чем отличаются картины, видимые каждым из них. Обе они попадают в мозг, и он без участия сознания анализирует незначительные различия между обеими картинами и таким путем создает представления объемности.

Ни в учебниках, ни в энциклопедиях Виктор не смог обнаружить, кто и когда впервые осознал все преимущества, даваемые высшим животным тем, что они обладают двумя глазами. Не нашел он и того, когда был изготовлен первый бинокль, объединивший две галилеевы зрительные трубы.

Готовя доклад для семинара о стереоскопическом зрении, Виктор познакомился с работами Гельмгольца, в середине прошлого века не только заложившего основы современной физиологии зрения, но и создавшего телестереоскоп — прибор, как бы раздвигающий глаза человека. С помощью двух пар параллельных зеркал, крайние из которых отстояли более чем на метр, наблюдатель видел удаленные предметы столь же объемными, как близкие видны невооруженными глазами. Теперь этот принцип положен в

основу большинства оптических дальномеров. Первый микроскоп для наблюдения двумя глазами оказался еще на двести лет старше, хотя осуществить его, пожалуй, было много труднее.

— Замечательно, — говорил Виктор на семинаре, — что первый стереоскоп, прибор для рассматривания объемных изображений, старше фотографии. Некий Р. Смит еще в 1738 году опубликовал специально изготовленный им парный рисунок и описал простенькое приспособление, способное создать у смотрящего через него на рисунок полную иллюзию объемности. Кто из нас не забавлялся подобными игрушками в детстве!

Виктор дотошно готовился к докладу, он даже блеснул небрежным упоминанием о том, как легко изготовить стереопару при помощи обычного фотоаппарата: достаточно сделать два снимка, не забыв перед вторым снимком сместить аппарат. Конечно, объект съемки должен оставаться неподвижным. Мозг делает свое дело безошибочно. Одновременность не обязательна даже при рассматривании. Можно достаточно быстро заслонять то один, то другой глаз. Важно лишь, чтобы в каждый глаз поступала соответствующая информация. Не следует только путать места правого и левого изображения.

Но тут взял слово Юрий Николаевич, и энтузиазм Виктора потух.

— Дело в том, — сказал Денисюк, — что после первого увлечения магией стереоскопа его популярность упала, хотя в продаже имеются и специальные стереофотоаппараты, и удобные стереоскопы. Слишком хлопотно. И несомненно, большая часть удовольствия пропадает, когда приходится смотреть в одиночку. Человек — общественное существо. Это проявляется даже в такой мелочи, как рассматривание фотографий.

— А кино? — зашумели в зале. — Вы забыли кино.

— Кино, конечно же, указало выход из тупика.

— Но частично. Кино стремилось овладеть стереоскопией, но отвергало все связанное с осложнениями для зрителя, даже специальные очки.

— Позвольте, вы забыли растровые системы, — это был ударный пункт выступления Виктора. Тысячи тонких проволочек, натянутых специальным образом, заслоняли от правого глаза то, что предназначено левому, и наоборот. Нужно было лишь слегка подвигать головой, чтобы поместить глаза в правильное положение.

— Каждый, хотя бы раз посетивший стереокино, несомненно, получил большое удовольствие от движущихся объемных изображений.

— Недавно принцип растра, — сказал Виктор в заключение, — вновь был применен для получения неподвижных объемных изображений. Я говорю об объемных открытках, появившихся теперь во многих странах. Правда, получить на них эффект стереоскопии можно лишь при соблюдении большой точности, доступной только в промышленных условиях, и делается это далеко не просто. Сдвоенное изображение надо наносить на прозрачную специальную пластмассу, на поверхности которой заранее отпрессованы тысячи мельчайших параллельных полосок. Они почти незаметны глазу, — уверял докладчик, — но их можно ощутить, проведя по поверхности ногтем. Они направляют каждому глазу ту часть изображения, которая предназначена именно для него. Вам кажется, что внутри толстого прозрачного слоя висят объемные предметы. И, взяв изображение в руку, вы с удивлением ощущаете, сколь оно тонко. И сколь сильна зрительная иллюзия, основанная на том, что мозгу в конечном итоге безразлично, каков источник поступающих к нему сигналов. Он в этих случаях как бы берет на вооружение пушкинские строки: «Ах, обмануть меня не трудно, я сам обманываться рад».

Если Виктор и не ожидал оваций, то и возражений он не ожидал. Его помощниками были солидные фолианты и даже вот высказывания классиков. Но Денисюк снова поставил точку над «і»:

— И все-таки стереоскопия не имеет будущего в получении объемных изображений. И не может его иметь. Уже задолго до новейших достижений стереоскопии было ясно, чего она не способна дать ни при каких условиях. Рассматривая стереоскопическую пару через стереоскоп или через современный растровый экран, вы видите изображение только так, как

его зафиксировал фотоаппарат. Только с той точки зрения, где стоял этот аппарат. Вы не можете взглянуть на предмет немного со стороны, даже если при этом могли бы открыться самые интересные детали. И ясно почему: на пластинке зафиксировано только то, лишь то, что «видел» объектив фотоаппарата. Все, что прошло мимо, безнадежно потеряно. Но потеряна и часть информации, попавшая на объектив. Она могла быть зафиксирована, но пропала втуне. Простите, но я снова повторяю, мы все еще не умеем фиксировать всю информацию, переносимую светом.

Горшки и боги

Виктор старался не пропустить ни одной возможности понаблюдать за работой Денисюка. Точность и изящество опытов аспиранта доставляли чисто эстетическое наслаждение. Он был так углублен в работу, что его не отвлекало присутствие посторонних — только бы не мешали. А Виктор и не считал себя посторонним, как-никак, а он прикомандированный студент. Но иной научный сотрудник всем своим видом давал понять: не болтайся под ногами. Или считал студентов даровой рабочей силой, способной лишь таскать аккумуляторы, сверлить дырки и подсоединять провода.

Денисюк понимал и ценил любознательных. Он на собственном опыте убедился в том, что развитие ученого во многом зависит от условий, в которые он попадает, от людей; его окружающих. У Виктора сложилось впечатление, будто Денисюк немного завидует ему, студенту университета. Виктор знал, что Денисюк тоже стремился поступить в университет, но жизнь распорядилась иначе.

Денисюк родился в Сочи в семье шофера и официантки. Отец рано ушел из жизни маленького Юры. Вскоре ему пришлось распрощаться и с солнечным югом. Мать переехала в Ленинград. Здесь он поступил в школу, здесь на мальчика обрушилась война. Целый год они оставались в заблокированном городе. Пережили все, что пришлось на долю мужественных ленинградцев. В сорок втором их эвакуировали. Сильный организм пятнадцатилетнего Юрия быстро справился с последствиями блокадных тягот. Он поступил в техникум. К тому времени в нем по-настоящему расцвела любовь к физике, склонность к которой возникла еще в школе. Юрий в свободное время читал вузовские учебники физики, углубленно изучал математику.

Как все мальчики военных лет, он торопил время, чтобы скорей стать взрослым, попасть в авиационные или в танковые войска, а физика и математика и знание мотора могли быстрее открыть ему двери военкомата. Но советский народ добился победы без его участия. В мирной жизни возникло множество неотложных дел.

Физика исподволь входила в его жизнь. Сперва, это было юношеское увлечение, сохранившееся и после того, как он возвратился в Ленинград, где окончил судостроительный техникум. Увлечение перешло в истинную страсть, когда обстоятельства заставили его отказаться от университета и поступить на работу.

Книги Поля де Крюи, не имевшие никакого отношения к физике, чудесным образом разжигали страсть к науке.

Мать сыграла решающую роль в жизни Денисюка. От нее он унаследовал и способности, и стремление к знаниям. Она стала инженером, и хорошим инженером, и он не мог от нее отстать. Денисюк поступил на вечернее отделение Ленинградского института точной механики и оптики. Иного выбора не было. Здесь существовал физический факультет, а на физическом факультете университета отсутствовало вечернее отделение.

Виктор знал, что даже после окончания института Денисюк не смог заняться физикой. Его направили в Государственный оптический институт, и он попал в лабораторию, где разрабатывали новые оптические приборы. Но физикой здесь занимались другие. Денисюк должен был решать инженерные задачи. И он решал их. Долг, прежде всего. Но были и свободные часы. Они принадлежали физике. Он продолжал готовить себя для физики.

Время от времени, когда Денисюк проявлял свои пластинки и полная темнота заставляла Виктора сидеть без дела, Денисюк делился с ним своими мыслями:

— Создавать новые оптические приборы, — говорил он, — сложно и интересно. Сложно потому, что они достигли высокого совершенства и каждый дальнейший Шаг здесь труден. Интересно, ибо только преодоление трудностей может увлечь по-настоящему. То, что дается легко, быстро надоедает. Мне как инженеру приходилось выполнять много простых заданий. Они были необходимы для лаборатории, но мне хотелось чего-нибудь посложней.

— А в это время, — продолжал Денисюк, — мне попался научно-фантастический рассказ. Его герой научился создавать, копии реальных предметов, не изображения, а именно копии. Точные копии, неотличимые от оригинала. Меня как обухом ударило. Возможно, я подсознательно стремился к чему-то подобному. Зерно попало в подготовленную почву. Мне казалось, я могу, я должен этого достичь. Конечно, такое в план не включишь. И я решил идти в аспирантуру. Мне повезло. Я поговорил с Евгением Федоровичем Юдиным, замечательным человеком и опытным фотометритом. Он меня понял и согласился быть моим руководителем. Правда, потом он признался, что не поверил моим бредням. Просто он увидел — человек горит, его не переубедишь. Творческий ученый, считал Евгений Федорович, всегда полезен. «Пусть Денисюк перебесится, — думал он, — погоняется за химерами, а потом возьмется за реальное дело». Но и потом, когда дело сдвинулось, он не мешал мне идти своим путем. Интересовался. И я, рассказывая ему о трудностях и препятствиях, легче находил пути их преодоления.

— Великое дело, — закончил Денисюк, — внимательный, вдумчивый слушатель. Он, как катализатор, возбуждает умственные реакции.

— Значит, вы пришли в науку от фантастики? — спросил Виктор.

— Считаю что так. Но скорее от философии. Я еще в вузе увлекся ленинской теорией отражения. Знаешь, как у него. Развитие от простейшей формы отражения, свойственной мертвой природе, к мышлению, высшей форме отражения. Мне захотелось найти способ отображать реальные предметы так полно, чтобы в отображении содержались мельчайшие особенности оригинала. Фотография не способна к этому, она показывает лишь плоские мертвые тени.

Иероглиф или письменный текст дают в каком-то смысле больше. Грамотный читает «собака» или «орел» и представляет себе образ до волоска, до перышка.

Я хотел при помощи оптики придумать такой код, такой шифр, чтобы он поддавался расшифровке без помощи воображения. И я нашел его в самой основе оптики. В свойствах световых волн, в законах волновых полей.

Виктору иногда казалось, что Денисюк в своем увлечении забывает о его присутствии. Он слышал не рассказ, не объяснение, а поток мыслей. Он становился участником творческого процесса. Денисюк как бы вновь и вновь переосмысливал свою работу, ее основы и детали. А Виктор лишь «отражал» мысли ученого, облегчая ему переход от одного шага рассуждений к следующему. Каждый предмет отражает свет по-своему, и свет уносит информацию о предмете. Очень подробную информацию о его форме и цвете, о способности поглощать и отражать различные световые волны. Фотографический объектив и эмульсия записывают лишь малую часть этого потока информации.

Гораздо большую информацию можно извлечь, сравнивая структуру волны, отраженной предметом, с падающей волной, с волной, бегущей от источника света и еще не искаженной никаким предметом... Не искаженной предметом... предметом...

Вот он, скачок, без которого невозможен прорыв в неведомое!

В этой мысли подсознательно сплелись и теория отражения, и волновая теория света. А явление интерференции — взаимодействия двух волновых полей, — открытое в начале прошлого века Томасом Юнгом, прямо указывало, как сравнивать поле падающего и отраженного света. Нужно наложить их одно на другое, заставить интерферировать и зафиксировать на фотоэмульсии результат. И потом... Что делать потом — ясно. Нужно

лишь вспомнить о зонной пластинке Френеля. Пластинке с нанесенной на ее поверхность системой концентрических колец, размеры которых были вычислены Френелем. Плоской пластинке, способной фокусировать свет, как выпуклая линза. Пластинка действует как линза!

Нет, не напрасно он, Денисюк, занимался оптикой. Теперь она должна отплатить ему сторицей и облегчить дальнейшее!

Денисюк хорошо знаком с этим видом оптической техники. Зонная пластинка Френеля представляет собой искусственный образ линзы, зашифрованную линзу. Чтобы расшифровать запись, достаточно направить на нее пучок света!

Для того чтобы зафиксировать на фотоэмульсии ту информацию, которая содержится в рассеянном свете, подходит далеко не всякий свет. Более того, ни один из источников, известных людям, не давал света нужного качества. Свет, испускаемый ими, подобен шуму. Энергия в нем может быть очень большой, но отсутствует порядок, свойственный звуковым волнам, порождаемым скрипкой, или тем волнам, которые бегут по морю в тихую погоду.

Денисюк получал упорядоченные световые волны, вырезая узкие спектральные линии из излучения мощных ртутных ламп.

И Виктору казалось, что тот ходит по замкнутому кругу. Стремясь все более упорядочить используемые волны света, он должен вырезать все более узкую спектральную область, а при этом неизбежно уменьшается поступающая в его распоряжение световая энергия. И все длиннее становится время, необходимое для образования шифра — интерференционной картины. И несмотря на все усилия, интерференционные картины при таком свете можно было получать только в совершенно затемненной комнате и лишь от небольших предметов, стоящих очень близко от приборов, загромождавших стол Денисюка.

Когда Виктор впервые попал в лабораторию к Денисюку, тот тратил большую часть своего времени совсем не на оптические эксперименты. Появился новый Денисюк, не физик, а химик и технолог, специалист по разработке и изготовлению фотоэмульсий. Обычные фотоэмульсии способны воспроизвести десятки отдельных линий на каждом миллиметре. Денисюку-оптику были необходимы эмульсии с разрешающей способностью в сотни, а лучше — тысячи линий на миллиметр. Но и это не все. Обычные эмульсии дают изображение только в тонком слое. Но то, что задумал Денисюк, требовало толстых эмульсий, пропускающих свет на достаточную глубину. И Денисюк-оптик беспощадно браковал результаты Денисюка-химика до тех пор, пока ценой огромных усилий не были созданы пригодные эмульсии.

Виктор как-то спросил:

— Почему вы не закажете эмульсии специалистам?

— Такие эмульсии пока нужны только мне. Специалисты и без того загружены важными работами. Но ничего — не боги горшки обжигают.

Цвет без красок

Рассказывая как-то о своем методе, Денисюк упомянул о цветных фотографиях Липмана. Он не думал, что заденет что-то такое в душе своего добровольного помощника и тот начнет по вечерам задерживаться в лаборатории. Виктора почему-то захватил способ получения цветных фотографий с помощью черно-белых эмульсий. Ничего нового, ничего сверх обычного в нем не было. И никаких особых перспектив он тоже не предвещал. Теперь этот метод цветной фотографии давно вытеснен новыми, использующими современные многоцветные эмульсии. Но что-то в липмановском способе Виктора увлекло.

Виктор даже изготовил одну такую фотографию, Самым сложным оказалось сделать специальную кассету, в которую надо было залить ртуть. Пластинка вставлялась в кассету эмульсией внутрь и плотно обжималась по краям. Затем в кассету наливалась ртуть.

Ртуть служила зеркалом, отбрасывающим свет, прошедший сквозь эмульсию, обратно в

нее. Обойтись без ртути было невозможно, и Виктору пришлось проделать эту работу в вытяжном шкафу химической лаборатории.

После того как все было закончено, Виктор проявил пластинку. С тех пор она стоит у него на столе. В ярком свете солнца или обычной лампы на ней можно видеть ярко-красную розу на фоне изумрудной зелени листьев.

Некоторые из знакомых Виктора ни за что не хотели поверить, что эта замечательная фотография сделана не на цветной эмульсии. Своим товарищам-студентам он мог доказать это при помощи микроскопа, сквозь который в эмульсии были видны лишь обычные черные пятнышки. Но не оптики ему не верили.

Для того чтобы по-настоящему понять причину чуда, нужно посмотреть на срез эмульсии сбоку. И это тоже не просто. Увеличение должно быть большим, предстояло рассмотреть структуру, размеры которой составляют доли микрона.

Нет, никаких красок скептики по-прежнему не видели. Однако в расположении черных точек нельзя было не заметить неожиданной регулярности. Оказывается, они группируются в слои, отстоящие один от другого на одинаковых расстояниях. Правда, эти расстояния в разных местах эмульсии различны, различна и плотность слоев, но бросалась в глаза почти полная их параллельность во всех частях эмульсии. Не оптику это, конечно, ни о чем не говорило. Но постигшим законы света открывалась еще одна замечательная особенность оптики: фотопластинка, экспонированная по методу Липмана, отличается тем, что ее черно-белая эмульсия зафиксировала не только контуры изображения букета роз, сформированного объективом, но и записала информацию о цвете отдельных частей изображения, причем так, что информация непосредственно преобразуется в соответствующие цвета при простом освещении пластинки белым светом.

Различия яркости объекта, как и в обычной фотографии, отображаются на пластинке степенью почернения соответствующего участка пластинки. Информация о цвете записана в чередовании черных и белых слоев, перемежающихся в толще эмульсии. Слои фиксируют стоячие световые волны, образованные взаимодействием волн, пришедших от объекта, и отраженных волн, отброшенных им навстречу зеркальным слоем ртути, расположенным за эмульсией. Это хитрый код, в котором записана информация о цвете предмета, и Липман сумел понять его и использовать.

Нечто подобное каждый видел и на поверхности воды, когда достаточно длинный цуг волн отражается от какого-либо протяженного неподвижного препятствия. На поверхности как бы застывает стоячая волна, но это волна не простая. Отраженная волна является продолжением падающей. Это две части одной волны, поэтому они строго согласованы между собой. Они взаимно когерентны, скажет физик, настолько же, насколько когерентны различные части самой падающей волны. Непосредственно у препятствия частицы воды практически неподвижны. На некотором расстоянии от него амплитуда колебаний максимальна. Это пучность стоячей волны. По мере удаления от препятствия пучности следуют на равных расстояниях одна от другой, отделенные узлами — областями, где вода остается практически неподвижной.

Расстояния между пучностями равны расстояниям между узлами. Они вдвое меньше длины волны, бегущей по свободной поверхности воды вдали от препятствия, куда не доходят отраженные волны.

Желая передать краски окружающего мира, Липман нашел способ фиксировать в фотоэмульсии стоячие волны света. Поверхностный слой эмульсии, примыкающий к зеркалу, остается прозрачным. Темные слои, отделенные равными прозрачными промежутками, — следы пучностей световых волн, то есть тех областей, где амплитуды падающих и отраженных волн складывались и интенсивность фотохимического действия была максимальной. Расстояния между слоями равны половине длины световой волны, для зеленого цвета равной 0,5 микрона, для красного примерно 0,6, для фиолетового — 0,4. Поэтому, в зависимости от цвета соответствующего места изображения меняется расстояние между темными слоями на липмановской фотографии.

Именно в этих расстояниях зафиксированы сведения о расцветке изображения. Эта тонкость, эта ювелирная работа света и покорила Виктора. Изящное сплетение пучностей и узлов как бы ждало дешифратора. Казалось, этот код никому не понять. А ключ к расшифровке липмановских фотографий был тем не менее очень прост. Нужно подставить их под пучок яркого белого света. Пластика отразит его так, что от частей, в которых слои отстоят на 0,25 микрона, побегут интенсивные волны зеленого цвета, там, где эти слои отстоят на 0,3 микрона, мы увидим красный свет, и так далее. Каждый участок пластинки действует как фильтр, оптический фильтр, выделяющий из хаоса белого света лишь волны, длина которых вдвое больше расстояния между слоями эмульсии. Только эти волны отражаются от каждого из слоев согласованно, так что каждая отраженная волна складывается с остальными, отраженными от других слоев. Волны, длина которых не соответствует расстоянию между слоями, отражаются от них хаотически. Каждая часть «чуждого» света, отразившаяся от различных слоев, имеет свою фазу, скажет физик. Поэтому, налагаясь, они не усиливают друг друга, а, смешиваясь между собой, образуют неопределенный сероватый фон, смазывающий окраску липмановских фотографий. Впрочем, качество этих фотографий ухудшалось и природой самой фотоэмульсии. Зернышки серебра на ней обычно слишком крупны, чтобы в черно-белом коде зашифровать всю световую гамму реального мира.

Как-то Денисюк в присутствии Виктора обсуждал со своими товарищами, аспирантами Кушпилем и Субботиным, проблемы научного творчества. Это был сложный и запутанный разговор. Виктор запомнил из него только один факт, рассказанный Денисюком.

Оказывается, Липман тоже мечтал о способе точного воссоздания объемной структуры предметов и даже провел большую работу в этом направлении. Но чем объяснить, что он, человек, первым сумевший зафиксировать в фотоэмульсии распределение волновых полей, стоявший на прямом пути к голографии — к открытию, которое вскоре принесло Денисюку и звание доктора наук *honoris causa*, и звание члена-корреспондента АН СССР, и Ленинскую премию, избрал другой путь?

Он хотел создать «окно в пространство предметов» и первым предложил применить для этого растровую оптику, ту, на которой основано современное стереокино и стереооткрытки. Но что это по сравнению с голографией, до которой он так и не дотянулся. Липман свернул обратно с перспективного пути волновой оптики в тупик геометрической оптики и уже не смог из него выйти.

Копия мира

Денисюк тратил время и силы на создание толстослойных эмульсий, объединяющих большую разрешающую способность с большой чувствительностью, вовсе не для усовершенствования цветных фотографий Липмана. Денисюк, реалист и настоящий ученый, отнюдь не стремился конкурировать таким путем с дешевыми и удобными методами современной цветной фотографии.

Он шел к более важным и трудным целям. Он стремился зашифровать в эмульсии обширную информацию о внешнем мире. Он хотел научиться воссоздавать предметы во всей их объемности. Хотел реальных копий. Хотел фантастику сделать былью.

Конечно, глядя на установку Денисюка, Виктор не без основания вспомнил о методе Липмана. Так по одному слову иногда вспоминаешь целое стихотворение.

Однако в методах Денисюка и Липмана общим было только одно — в обоих стоячие волны света фиксируются в толще фотографической эмульсии. Все остальное различно — и цель, и метод получения стоячих волн, и сам источник света. В установке Денисюка не было не только фотоаппарата, без которого невозможно получение липмановских фотографий, но даже фотографического объектива. Зато ему приходилось защищать свою установку от любого постороннего света, работать в затемненной комнате.

Виктора поражала простота этой установки. Больше всего места на массивном столе занимала мощная ртутная лампа в непроницаемом металлическом кожухе, охлаждаемом водой. Свет лампы выходил наружу лишь через специальный фильтр, пропускающий только чрезвычайно узкую часть спектра. Этот свет делился на две части. Одна попадала на плоское зеркало и отражалась от него на фотографическую пластинку. Другая часть освещала миниатюрную шкалку, укрепленную на специальном штативе. На шкалке были видны тоненькие черточки и маленькие цифры.

Из полной темноты призрачным зеленым светом вырваны эта шкалка и прямоугольная фотопластинка. Больше ничего не видно. Все случайные блики поглощаются тяжелыми черными занавесями. Даже присутствие зеркала и самой лампы угадывается лишь по блеску случайных пылинок. Долго, очень долго длится экспозиция, А потом пластинка проходит обычные процедуры проявления, фиксирования, промывки и сушки.

Виктор внимательно рассматривал эти пластинки, стараясь найти на них какие-нибудь признаки изображения. Но тщетно. Пластинки казались серыми, будто они были засвечены неопытным фотографом. Правда, под микроскопом на них обнаруживались непонятные призрачные узоры. Но и микроскоп не показывал ничего похожего на шкалку, образ которой должен был быть зафиксирован на пластинке.

Однако стоило осветить эту пластинку ярким солнечным светом или просто светом сильной электрической лампы, как происходило чудо. За пластинкой возникала шкалка, точно такая, как та, что стояла здесь несколько часов назад, а теперь лежит в коробочке, спрятанной в ящике стола.

Виктора поражало, что шкалка казалась освещенной зеленым светом, хотя свет, падающий на пластинку, был белым. Но еще более неожиданным было другое. Передвигая голову из стороны в сторону, можно было разглядывать шкалку с разных сторон. Она казалась столь реальной, что хотелось потрогать ее рукой, но протянутая рука встречала лишь пустоту. Там, где глаза ясно видели шкалку, ничего не было!

Денисюк торжествовал, наверное, не менее, чем известный всему свету художник, нарисовавший на своей картине муху так, что каждый, кто подходил к картине, хотел ее смахнуть. Говорят, что эта муха родилась в результате соревнования двух гениев, стремившихся превзойти друг друга в реалистичности своих картин.

У Денисюка пока не было соперника, и он не мог столь вещественно убедиться в силе своего искусства. Впрочем, соперник у него был, правда на другом конце Европы, но Денисюк пока о нем ничего не знал и не мог сравнить свои результаты и его.

Пока он радовался один. Ему удалось зафиксировать образ предмета и воспроизвести его! Пусть на самой пластинке и не видно ничего похожего на объект. Но и слово, написанное на бумаге, ничем не похоже на то, что оно обозначает. Однако оно по-своему отображает мир, и человеку достаточно прочесть его, чтобы воссоздать его смысл. Пластинка Денисюка делала почти то же. На ней не было обычного изображения, но при подходящем освещении удивительно жизненное изображение появлялось за пластинкой.

Денисюк очень сожалел, что не смог показать такую пластинку Юдину. Евгений Федорович долго и сильно болел, а потом скончался от рака горла незадолго до окончания решающего опыта. Он успел увидеть лишь первое подтверждение правильности идей своего аспиранта. Денисюк изготовил на своей установке образ вогнутого зеркала, и этот образ вел себя как настоящее вогнутое зеркало, сводил лучи света в точку. Как и ожидал Денисюк, образ зеркала напоминал зонную пластинку Френеля, ведь оптические свойства выпуклой линзы и вогнутого зеркала почти одинаковы.

Но если зонную пластинку обычно изготавливали при помощи циркуля, то Денисюк получил свой «шифр» зеркала чисто оптическим путем. И шифр этот был не плоским, как обычная зонная пластинка, а многослойным, объемным. И благодаря этому пластинка Денисюка отбирала и фокусировала только лучи того цвета, при помощи которого на ней был получен зашифрованный образ зеркала.

И Юдин, уже тяжело больной, поздравил своего аспиранта с замечательной удачей.

Предшественник

Смерть Юдина была тяжелым ударом для Денисюка. В то время он все еще считался чудачком, и его работы не принимались всерьез.

Вскоре Денисюку пришлось перенести и еще одно потрясение. Один из сотрудников оптического института, возвратившись из заграничной командировки, привез сборник аннотаций, докладов, прочитанных на конференции, в которой ему пришлось участвовать. В аннотации одного из докладов, показавшейся ему интересной, Денисюк обнаружил ссылку на статью некоего Дениса Габора. Что зацепило его? Он поспешил в библиотеку и, о ужас, прочитал в четкой и ясной форме то, что он во многих вариантах заносил в свою лабораторную тетрадь!

Те же мысли о несовершенстве фотографии, те же идеи о возможности фиксации волнового поля объекта. Денисюку показалось, что он повторил работу, выполненную Габором за десять лет до того...

Он отыскал все доступные ему работы Габора. Сидел не разгибаясь несколько дней и ночей... И у него отлегло от сердца. Да, они стремились к одной цели, исходили из тех же предпосылок, но пошли различными путями. В их работе много общего. Но были и чрезвычайно важные различия. И не просто различия. Каждый из них добился несколько иного.

Денисюк считал, что лучший способ понять сложную проблему — это попытаться рассказать о ней другому. Поэтому, помня добросовестность и тщательность доклада, сделанного Виктором на предыдущем семинаре, он предложил Виктору подготовить доклад на студенческом кружке о работах Габора и охотно помогал ему.

Денис Габор, член Королевского общества Великобритании, обладатель многих научных степеней и званий, родился в Будапеште, где после школы приступил к изучению электротехники. Закончил специальное образование в Берлине и в 1927 году получил диплом доктора-инженера за работу «Запись переходных процессов в электрических цепях при помощи катодного осциллографа». В этой работе он первым применил для записи переходных процессов магнитную линзу с железным сердечником и бистабильную электронную схему. И то и другое сейчас широко применяется и в специальных устройствах, включая вычислительные машины, и в большинстве телевизоров.

Габор многие годы работал в Берлине, исследуя электрический разряд в газах, в том числе и то, что теперь называется плазмой. В ходе этих работ он изобрел способ соединять металл со стеклом, применяя тонкие ленточки из молибдена.

Вскоре после захвата власти фашистами Габор покидает Берлин и переселяется в Англию. Здесь он изобретает катодную трубку с памятью, широко применяемую и во многих вычислительных машинах, и в радиолокаторах. Здесь в результате длительной работы он изобрел новый способ получения изображений.

В то время Габор считал важнейшей задачей усовершенствование электронного микроскопа. Электронный микроскоп отличается от обычного не принципом действия, а лишь тем, что в нем изображение образуется не световыми волнами, а электронами, попадающими на фотографическую эмульсию после того, — как они прошли через исследуемый объект. В том месте эмульсии, куда попал электрон, после проявления возникает почернение. Там, куда попало больше электронов, почернение оказывается более интенсивным.

Линзы, используемые в электронном микроскопе, конечно, отличаются от оптических линз. Это магнитные или электрические линзы, обмотки или электроды которых создают соответственно магнитные или электрические поля, искривляющие траектории полета электронов, подобно тому как оптические линзы искривляют световые лучи. Несмотря на существенное физическое различие этих линз, результаты их действия оказываются весьма

близкими.

Электронный микроскоп, как и оптический, формирует в плоскости, в которой расположена фотоэмульсия, резкое и четкое изображение только от малой части исследуемого объекта. Резкие изображения остальных частей могут быть получены соответствующим перемещением эмульсии или изменением тока через магнитные линзы или напряжения на электрических линзах. Одновременно получить на эмульсии резкое изображение всей толщи объекта невозможно. Не сфокусированные части объекта дают на снимке фон, лишь ухудшающий качество изображения и не дающий никакой дополнительной информации об объекте.

Габор вновь и вновь возвращается к мысли о том, что поток электронов, прошедших сквозь объект, несет в себе полную информацию о всех взаимодействиях, испытанных электронами в толще объекта. И в нем крепко стремление найти путь к использованию такой информации. Он ясно понимал, что успех, достигнутый при решении этой специальной задачи, будет иметь гораздо более широкое значение. Ведь и свет, падающий на объектив фотоаппарата или на зрачок глаза, содержит обширную информацию о всех предметах, от которых исходит свет. Но ни глаз, ни фотоаппарат, ни электронный микроскоп не могут одновременно образовать резкого изображения всех деталей независимо от их местоположения. Такова природа образования изображения при помощи линз. Линзы отображают на плоскости только плоские объекты, расположенные в определенных «сопряженных» плоскостях. Почернение фотоэмульсии пропорционально интенсивности воздействующих потоков фотонов или электронов. В результате фотоэмульсия фиксирует лишь ничтожную часть информации, переносимой светом или электронами.

Габор первым противопоставил скудость фотоизображения богатству информации, содержащейся в световом или электронном потоке. Он же указал путь преодоления этого разрыва.

Удача Габора

Путь, предложенный Габором, и сейчас кажется парадоксальным. Он состоял из нескольких скачков.

Первый — отказ от применения линз, ибо, формируя изображение одной плоскости объекта, линзы приводят к потере информации об остальной, причем большей, его части.

Второй — фиксирование на фотоэмульсии не изображения объекта, а по возможности всей информации о нем, переносимой пучком электронов или лучами света.

Третий — использование записанной информации для того, чтобы впоследствии создавать пучки света, несущие в себе всю эту информацию.

И четвертый — формирование при помощи этих пучков света изображения того объекта, информация о котором была зафиксирована в первой стадии процесса.

Габор подчеркивал, что радикальное отличие нового метода от обычной фотографии, которая записывает на фотоэмульсии изображение предмета в один прием, состоит в том, что процесс получения изображения разбит на два этапа, происходящих в различные моменты и совершенно независимо. Сперва на фотоэмульсию записывается информация об объекте, содержащаяся в потоке света или электронов, взаимодействующих с объектом. После проявления записанная информация может храниться сколь угодно долго, и, когда нужно, можно приступить ко второму этапу — воссозданию изображения на основе этой информации. Габор назвал свой метод голографией, прибегнув, как обычно, к греческому языку. «Голограмма» означает «полная запись». Воссоздание изображения при помощи голограммы он назвал «реконструкцией».

Рассматривая голограмму невооруженным глазом или даже под микроскопом, на ней невозможно обнаружить никакого изображения объекта. Невооруженному глазу пластинка представляется просто испорченной. Под микроскопом на ней можно увидеть хаотическое

скопление мельчайших пятнышек, образующих кое-где узоры, напоминающие рябь, поднимаемую порывистым ветром на поверхности тихого пруда.

Всякому, имеющему хоть малейший опыт в фотографии, ясно, что получить такую запись, попросту поместив фотоэмульсию на пути потока электронов или света, взаимодействовавших с объектом, нельзя. Фотоэмульсия, реагирующая лишь на интенсивность потока, сама по себе способна зафиксировать только ничтожно малую часть информации, заключенной в этом потоке. Наивная попытка такого рода неизбежно приведет к порче пластинки. Она будет засвечена, скажет фотолюбитель.

Для того чтобы записанная информация оказалась более полной, необходимо принять особые меры. Заслуга Габора определяется тем, что он не только понял слабость известных методов, но предложил новый и нашел путь его реализации.

Габор первоначально имел дело с электронным микроскопом. Но его идеи весьма универсальны и применимы ко всем случаям, когда информация о каком-либо объекте переносится волнами. Это могут быть и звуковые волны. Электронный микроскоп лишь частный случай. Для его действия существенно, что электроны подчиняются волновым закономерностям. Волновые свойства электронов доминируют в электронном микроскопе в такой же мере, как их корпускулярные свойства играют основную роль в работе радиоламп и фотоэлементов.

Готовясь к докладу на семинаре, Виктор внимательно изучил те статьи Габора, которые ему удалось найти.

Его, как и Денисюка, захватили работы Габора, заинтересовала сама личность ученого. Их обоих удивили и разносторонность интересов Габора, и широта подхода к казалось бы локальным проблемам. Он показался обоим личностью обаятельной и несколько даже загадочной. Даже биография шестидесятилетнего ученого была необычной и удивляла непоследовательной щедростью и расточительностью научных идей. И Денисюк и Виктор много думали о нем, гадали о его научных перспективах. Доклад получился общим.

Для того чтобы рассказать товарищам, как волновая сущность электронов проявляется в электронном микроскопе, и передать всю глубину идей Габора, Виктор смог обойтись без помощи квантовой физики и даже без ссылок на ранний вариант квантовой механики — волновую теорию де Бройля.

— Достаточно лишь принять, — сказал он в предисловии, — как опытный факт, что все то, что при работе оптического микроскопа является результатом действия световых волн, наблюдается и в электронном микроскопе. Все, за исключением масштаба. Ибо длина волн видимого света лежит в пределах от 0,4 до 0,8 микрона, в то время как волны, связанные с электронами, много короче.

Шутки русалки

Свой рассказ Виктор начал не со света, а с волн, бегущих по поверхности воды после падения камня. Он призвал на помощь маленьких гномиков, живущих на берегу пруда и неспособных видеть, что происходит в его середине.

— Если они будут, — говорил Виктор, — в безветренную погоду наблюдать за волнами, приходящими к берегу, они смогут узнать многое. Например, если волны имеют форму кусков окружности, значит они вышли из какого-то центра. Определив, как идут касательные в двух точках этой волны, гномы легко выяснят не только расстояние до точки, из которой вышла волна, но и ее точное положение на поверхности пруда.

— А теперь представьте себе, — продолжал он, — что русалка, живущая в этом пруду, захотела подшутить над нашими гномами, слишком хваставшими своим умением. Взяв у Амура его лук, она прицелилась в гнома, но вместо того, чтобы выпустить разящую стрелу, повернула лук горизонтально и ударила им по поверхности воды. Вы представляете себе, каким русалочьим смехом она залилась, когда бесхитростный гном сообщил ей точные

координаты падения камня? И как она с самоуверенностью первокурсницы доказывала, что лук, согнутый по форме части окружности, возбудил волну, которую невозможно отличить от порожденной камнем, если наблюдать ее лишь в малом участке удаленного берега. И ведь она права, — уже серьезно заключил Виктор, — даже миллионы гномов, став плечом к плечу вокруг всего пруда, не смогут сказать, упал ли на поверхность воды камень, или красавица забросила туда свой обруч.

Мораль проста. Зная, какая информация передается волной, можно создать точно такую же волну иным способом и воспроизвести эту информацию еще раз, не повторяя события, бывшего ее первоначальным источником.

Два камня, одновременно упавшие в воду, возбуждают две кольцевые системы волн. Чем больше камней, тем сложнее картина, образуемая волнами. Но, зная законы физики и проведя достаточно внимательно необходимые наблюдения, можно не только выяснить, в каких точках должны были падать камни, но и воспроизвести эти волны, воздействуя на поверхность воды шаблонами соответствующей формы.

Именно такую задачу поставил и решил Габор. Он нашел способ зафиксировать волну, взаимодействовавшую с объектом наблюдения, так, чтобы можно было впоследствии воспроизводить такую же волну сколь угодно много раз. Габор определил, насколько подробно необходимо фиксировать информацию о записываемой волне, чтобы реконструируемая волна воспроизводила сведения об объекте. Он указал, каким путем достичь поставленной цели, и на опыте подтвердил правильность нового метода.

Для того чтобы зафиксировать световую волну, отображающую объект, он ставил на ее пути фотопластинку и направлял на нее также часть света прямо от источника, освещавшего объект. Складываясь между собой, обе эти волны образовывали систему стоячих волн, которая и фиксировалась в эмульсии после ее проявления в виде системы мельчайших темных и светлых полосок. Так получалась голограмма. Потом Габор направлял на голограмму свет от того же источника. И происходила поразительная вещь. Темные полоски голограммы устраняли из света все лишнее, все то, что не несло информацию о предмете. А пропускали через себя лишь точно такие же световые волны, которые при получении голограммы попадали на нее от объекта.

Если теперь свет, прошедший через голограмму, попадал в глаза наблюдателю, у того создавалась полная иллюзия того, что там, за голограммой, имеется реальный объект.

— Однако, — закончил Виктор, — несмотря на несомненную перспективность работ Габора, они не получили развития. Более того, они оказались надолго забытыми. Причина заключалась в отсутствии источников света, необходимых для эффективной реализации идей Габора.

Теперь мы могли бы сказать: Габор, подобно хорошему разведчику, действовал далеко впереди общего фронта науки и техники. Да и доклад Виктора относился еще к лазерной эре. Развивая его рассуждения, можно охарактеризовать ситуацию, не изменившуюся и ко времени начала работ Денисюка, следующим примером. Дело обстояло так, как если бы русалка, желая еще раз подшутить над гномами, раздробила камень в мелкий порошок и высыпала его в воду. В результате до берега добежала лишь столь беспорядочная и слабая рябь, что гномы не смогли ничего понять даже с помощью наиболее совершенной электронной вычислительной машины.

Все источники света, существовавшие в период первых работ Габора, как, впрочем, и те, с которыми мы и теперь встречаемся в обычных условиях, возбуждают световые волны примерно так же, как песчинки в опыте нашей русалки. Каждая частичка раскаленной проволоочки в лампе накаливания, каждый атом в газосветной лампе излучают световые волны независимо от других. Наш глаз приспособлен к этому. Он реагирует лишь на интенсивность света. Так же ведет себя фотоэмульсия. Им важна не тонкая структура проходящих волн, а только полная энергия, приносимая всеми волнами. Точнее, глаз и фотоэмульсия фиксируют распределение световой энергии по светочувствительной поверхности. Но сведений о распределении энергии совершенно недостаточно для того,

чтобы воспроизвести еще раз совокупность волн, действовавших на фотоэмульсию.

Свои опыты Габор проводил со световыми волнами. Эксперимент с электронами был намного сложнее, да и необходимость в нем в существенной мере отпала. Другие исследователи к тому времени значительно усовершенствовали электронный микроскоп, так что несовершенная еще методика Габора оказалась неконкурентоспособной.

Однако, как показали дальнейшие статьи Габора, которые в изобилии появлялись в научных журналах, Габор не был обескуражен. В науке оставалось много нерешенных проблем, способных привлечь настоящего исследователя, и он занялся другими работами, надолго отказавшись от «неудачной». Габор построил структурный вариант теории информации, значительно отличающийся от статистической теории Винера — Котельникова — Шеннона. Он разрешил загадочный парадокс Ленгмюра, объяснив, почему и как электроны в низкотемпературной плазме способны неожиданно быстро приходить к равновесному — максвелловскому состоянию.

Добавим и то, о чем не мог знать Виктор, докладывая в далеком от нас 1959 году о работах Габора. Теперь Габору 70 лет, но он продолжает активно работать. Габор живо интересуется социальными проблемами. Его книга «Изобретая будущее», изданная в 1963 году и переведенная на семь языков, оказала заметное влияние на современную футурологию — науку, имеющую целью научно прогнозировать будущее развитие человеческого общества, включая науку и многое другое. Габор работает и над созданием плоского телевизионного экрана, который можно было бы вешать на стену, как картину...

Объемная голография

Внимательно изучив работы Габора и сравнив их со своими, Денисюк смог со всей ясностью установить и их идейную общность, и всю глубину их различия.

Общей была задача отображения объекта путем фиксации волнового поля, исходящего от объекта. Общим был метод фиксации, основанный на сравнении этого волнового поля с опорным волновым полем, например с полем сферических волн. Общим был способ расшифровки записи, при котором на голограмму (Денисюку понравился этот термин) направлялась волна такой же структуры, как и структура опорной волны, использованной при получении голограммы. Этим и ограничивалась общность. На ее фоне четко выступали различия. И были ясно видны причины, направившие ученых различными путями. Габор отталкивался от электронного микроскопа. Может быть, поэтому и в его оптических опытах опорный пучок света направлялся на пластинку с той же стороны, что и свет от объекта.

Денисюк, может быть бессознательно, опирался на опыт Липмана, у которого эти пучки падали на эмульсию с различных сторон. У Габора интерференционные максимумы отстояли сравнительно далеко один от другого, и в каждом участке эмульсии располагался лишь один из них. Можно сказать, что эмульсия давала плоский разрез поля стоячих волн. В опытах Денисюка интерференционные максимумы располагались очень близко один от другого, так что в толще эмульсии укладывалось много таких максимумов. В эмульсии фиксировалась объемная структура стоячих волн. При этом Денисюку, конечно, нужны были очень хорошие эмульсии.

Такие, казалось, незначительные различия вели к существенным последствиям. Расшифровывать плоские голограммы Габора, рассматривать зафиксированный на них объект можно было только при столь же монохроматическом (одноцветном) свете, как тот, при котором голограмма была получена. Но ограниченная чувствительность глаза приводила при этом к резкому ограничению объема пространства, отображенного голограммой. Для увеличения объема требуется сужать спектр, а применение узкополосных фильтров уменьшает яркость света, и глаз ничего не видит.

Объемные голограммы Денисюка можно рассматривать при ярком белом свете. Они сами, подобно липмановским фотографиям, отфильтровывают нужную часть спектра. А

применение узкополосных фильтров при получении голограммы не ограничивается чувствительностью глаза. Оно приводит только к увеличению времени экспозиции. Одно это различие давало Денисюку возможность применять голографию там, где метод Габора был совершенно непригоден.

Но обнаружилось и второе существенное различие. При рассматривании голограммы Габора образовывалось сразу два изображения объекта — действительное, подобное тому, что видно через выпуклую линзу, и мнимое, аналогичное возникающему в обычном зеркале. Изображения налагались друг на друга, вызывая взаимные помехи.

Метод Денисюка приводил к одновременному восстановлению лишь одного изображения объекта. Это могло быть действительное изображение или мнимое, в зависимости от того, с какой стороны направлялся на голограмму пучок света при восстановлении изображения. Благодаря такому свойству объемной голограммы не возникало искажений, свойственных методу Габора.

Не менее отчетливо видны и различия между объемной голограммой Денисюка и цветной фотографией Липмана, объединяемыми тем, что та и другая основаны на возникновении в толще эмульсии пространственной системы, соответствующей распределению пучностей стоячих волн света. В фотографиях Липмана белый свет, отраженный от объекта, попадает на объектив, а объектив рисует плоское изображение объекта на эмульсин. Ртутное зеркало, отражая обратно свет, прошедший эмульсию, образует в ней систему стоячих волн. После проявления в эмульсии возникают слои почернения, выделяющие из белого света цвета, «окрашивающие» изображение. Все сведения о пространственной структуре объекта оказываются утраченными в результате комбинации специфических свойств объектива и фотоэмульсии.

В голограмме Денисюка зеркало, образующее опорный пучок света, вынесено на некоторое расстояние от эмульсии. Он использует упорядоченный фильтром одноцветный свет, выделенный из излучения ртутной лампы. И жертвует воспроизведением окраски объекта. Но он может обойтись без объектива, без непосредственного формирования изображения и благодаря этому получает возможность полностью фиксировать сведения о пространственной структуре объекта, о его форме.

Но Денисюк называет свою голограмму объемной не потому, что она способна воспроизводить объемность объекта, этого можно достигнуть и при помощи плоской голограммы Габора, а лишь потому, что его голограмма формируется во всем объеме толстослойной эмульсии. Только это позволяет ему реконструировать изображение в белом свете и избежать искажений, свойственных голограммам Габора.

В отличие от Габора Денисюк не прекращал работы в области голографии. Дело двигалось медленно. Основным препятствием оставалось отсутствие подходящего источника света. Но, может быть, Денисюк предчувствовал грядущую революцию в этой области. Ведь квантовая электроника уже тогда достигла высокого уровня развития. Денисюк не занимался ею. У него хватало своих проблем. Однако он внимательно следил за работами Басова и Прохорова, за статьями других советских и иностранных ученых.

Конечно, и для Денисюка известие о создании первого лазера было сюрпризом. Можно понимать глубокое родство между радиоволнами и светом, сознавать принципиальную возможность получения оптических волн, по упорядоченности — когерентности — не уступающих радиоволнам. Следить за тем, как Басов и Прохоров и Таунс с сотрудниками идут в этом направлении. Но кто мог предсказать, что именно в 1960 году, почти одновременно, Мейман создаст лазер на рубине, а Джаван с сотрудниками — лазер на смеси гелия и неона.

Естественно, первые лазеры были несовершенны. Но стала ясна близкая перспектива. Благодаря усилиям многих ученых она вскоре превратилась в реальность. Лазеры теперь столь стабильны, что они способны покрыть системой упорядоченных стоячих световых волн объемы размером во много кубических метров.

Именно этого и недоставало для нужд голографии. Теперь перед нею открылись

огромные возможности.

Не приходится сомневаться в том, что Денисюк тотчас начал работать с лазерами. Первоначально они ничего не изменили в его методе. Просто стало удобнее и легче работать. Заменяв лазером ртутную лампу с фильтром, Денисюк смог получать голограмму значительно быстрее. В ряде случаев, практически за мгновения. Очень существенное обстоятельство.

Теперь голография имеет дело не со специально изготовленными миниатюрными объектами и даже не с шахматными фигурами и игрушками, а с предметами обычной жизни и техники. А в технике скорость исследования играет не последнюю роль.

Лазер внес в работу Денисюка еще одно важное достижение. Объемная голограмма способна запомнить столь полную информацию об объекте, что, освещая его тремя лазерами, дающими синее, зеленое и красное излучения, Денисюк может получать голограммы, которые при солнечном свете дают не только объемное, но и многоцветное изображение.

Но Денисюк — реалист, умеющий разумно оценивать и нужды техники, и потребности искусства. Он отнюдь не стремился конкурировать таким путем с современными дешевыми и удобными цветными фотоэмульсиями, фиксирующими цветное изображение при естественном освещении, непосредственно кодируя его в трех основных цветах. Он увидел в лазерах средство получения изображений одновременно и объемных и цветных.

Конкуренты

Вскоре выяснилось, что объемная голограмма Денисюка не единственный возможный вариант лазерной голографии. Лазер оказался гибким орудием. И всякий смог применить его по-своему. Ведь и обычный карандаш в руках разных людей приводит к несходным результатам: один пишет роман, другой сонет, а третий докладную записку. Совершенно независимо от Денисюка после появления лазеров начали исследования в области голографии Эммет Лейт и Юрис Упатниекс, сотрудники Мичиганского университета. Они ранее специализировались в области радиоп физики, и им было легко почувствовать принципиальную общность между идеями Габора и некоторыми методами, давно применяемыми в радиотехнике. Поэтому, несомненно, они смогли предвидеть чрезвычайно широкие возможности, открываемые перед голографией применением лазеров, этих полупредов радиотехники в царстве оптики.

Радиопередатчик излучает в пространство радиоволны вполне определенной частоты. Они в высшей степени когерентны. Но в таком виде радиоволны несут предельный минимум информации. Приняв их, можно лишь узнать, что передатчик включен, измерить его частоту и определить местонахождение.

Для того чтобы передать по радио какую-нибудь информацию, необходимо нарушить неизменность радиоволн, вплести в них информацию, подлежащую передаче. Для этого можно изменять амплитуду, частоту или фазу волны. Эта процедура называется модуляцией — амплитудной, частотной или фазовой соответственно. Саму радиоволну, над которой проводятся эти процедуры, радисты называют несущей.

Для того чтобы в месте приема извлечь из модулированной несущей информацию, которую она несет, необходимо провести операцию, обратную модуляции, — демодуляцию. В результате образуются сигналы, при помощи которых можно на экране телевизора восстановить передаваемые изображения или при помощи громкоговорителя восстановить переданный звук.

Одним из простейших методов, теперь почти не применяемых в радиотехнике, является гетеродинный прием. Модулированная несущая смешивается в приемнике с сигналом местного гетеродина. Этот опорный сигнал в точности совпадает по частоте с сигналом передатчика. Простое устройство вычитает его из принимаемого. В разности остается то, что

было внесено в несущую в процессе модуляции. Остается информация, передача которой и является целью радиосвязи. Лейт и Упатниекс поняли, что применение лазера позволяет реализовать идеи Габора совершенно аналогичным путем.

Свет лазера, обладающий высокой степенью когерентности, играет роль несущей. При рассеянии света от объекта строгое постоянство лазерных волн нарушается. Это не что иное, как модуляция. Отдельные точки объекта по-разному воздействуют на амплитуду и фазу соответствующего участка волны. Каждая точка объекта превращает упавшую на нее часть волны в разбегающуюся сферическую волну, несущую в себе информацию об оптических свойствах этой точки поверхности объекта. Вся система разбегающихся от объекта волн содержит в себе наиболее полную, из возможной оптической, информацию об объекте. Если часть этих волн попадает в глаз, мы видим объект.

Лейт и Упатниекс поставили перед собой задачу зафиксировать на фотоэмульсии всю информацию, заключенную в свете лазера, рассеянном объектом. Они поставили фотопластинку так, чтобы на нее падала часть рассеянных волн, и при помощи зеркала направили на нее пучок света непосредственно от лазера. По аналогии с радиотехникой они назвали пучок опорным.

В процессе взаимодействия волны, пришедшей от объекта, и опорной волны метод Лейта и Упатниекса ни в чем не отличается от метода Денисюка. В той части пространства, в которой опорный пучок света налагается на рассеянный, возникает система стоячих волн. Стоячие волны воспринимают всю модуляцию, вносимую объектом в падающий на него свет. Таким путем полная информация об объекте переносится в стоячую волну. Но так как в каждую точку пространства попадают рассеянные волны от каждой из точек поверхности объекта, эта информация запечатлевается в любой точке стоячей волны. В том числе она фиксируется в каждой точке фотопластинки, помещенной там, где на нее может одновременно действовать и свет, рассеянный объектом, и опорный пучок.

Коренное отличие от метода Денисюка обнаруживается на стадии взаимодействия света с фотопластинкой. Лейт и Упатниекс, как и Габор, пользовались пластинками, покрытыми тонкослойной эмульсией. Поэтому на их пластинках не могли одновременно поместиться несколько пучностей стоячей волны. В них не получалось ничего похожего на многослойный оптический фильтр, позволявший Денисюку восстанавливать изображение при помощи белого света.

Тонкослойная эмульсия пересекает систему стоячих волн, как пила древесный ствол, обнаруживая скрытую систему годичных колец. В результате на эмульсии возникает сложный узор, в котором и заключена вся информация. Разница в толщине слоя фотоэмульсии привела, таким образом, к существенному различию в структуре голограммы, и это, конечно, сказалось на стадии восстановления изображения.

Лейт и Упатниекс должны были освещать полученную ими голограмму светом лазера, который выполнял ту же функцию, что гетеродинный сигнал в радиоприемнике. Пройдя через голограмму, свет оказывается промодулированным. Он воспринимает всю информацию, заключенную в голограмме. Смотря сквозь голограмму, можно увидеть, как и по методу Денисюка, объемное изображение объекта, как бы висящее в воздухе за голограммой. Возникают все эффекты, с которыми мы уже знакомы, но в отличие от предыдущего цвет изображения совпадает не с окраской объекта, а с цветом лучей лазера.

Существеннейшее отличие плоской голограммы от объемной проявится при попытке воспользоваться для восстановления изображения белым светом. Объемная голограмма Денисюка, действующая подобно многослойному интерференционному фильтру, отбирает из белого света ту длину волны, при помощи которой была получена голограмма, так что воспроизводимое изображение имеет точно тот же цвет. Плоская голограмма состоит из одного слоя, заполненного точками и линиями, образовавшимися в результате разреза плоскостью фотоэмульсии пространства, заполненного стоячей волной. Она не может справиться с этой задачей. При освещении белым светом она не даст ровно ничего.

Плоская голограмма, так же как объемная, содержит полную информацию о форме

объекта, но в отличие от объемной голограммы плоская голограмма не содержит информации о цвете объекта.

Действительность и иллюзия

Однако это тот случай, когда слабость обращается в силу. Вследствие того, что плоская голограмма не обладает свойствами многослойного фильтра и нечувствительна к цвету объекта, мы можем восстановить записанное в ней изображение при помощи любого лазера, а не только тем, который применялся при получении голограммы. Более того, если при воспроизведении плоской голограммы применяется более длинноволновое излучение, чем при записи, изображение окажется увеличенным. Например, если голограмма получена в ультрафиолетовых лучах длиной 0,23 микрона, а изображение восстанавливается при помощи рубинового лазера, то увеличение равно трем. Для голограмм, получаемых в рентгеновых лучах или при помощи электронного микроскопа и восстанавливаемых в видимом свете, увеличение достигает сотен. О голографическом микроскопе, дающем еще большие увеличения, мы расскажем поподробнее ниже. Сейчас же постараемся понять, как такой метод создает цветную иллюзию.

Если плоская голограмма освещается белым светом, то в ней одновременно возникает множество изображений одного и того же объекта, каждое в одном цвете, причем масштабы изображений будут различными — крайне красные будут вдвое больше наиболее фиолетовых. Все изображения сольются в глазах наблюдателей в серую пелену.

И тем не менее при помощи плоской голограммы можно получить объемное трехцветное изображение. Для этого необходимо на одну голограмму записать информацию об объекте в трех цветах — синем, зеленом и красном — и при восстановлении изображения пользоваться одновременно тремя лазерами, дающими эти же цвета.

Второе существенное отличие плоской голограммы от объемной состоит в том, что она дает одновременно два изображения объекта — действительное и мнимое. Действительным изображением называется такое, которое образуется на экране, например на киноэкране или на фотопластинке, стоящей позади объектива. Мнимое изображение невозможно непосредственно наблюдать на экране. Его необходимо предварительно преобразовать в действительное при помощи выпуклой линзы. Но мнимое изображение можно видеть глазом, так как хрусталик, являющийся выпуклой линзой, преобразует его на сетчатке в действительное изображение. Дело опять в том, что плоская голограмма не обладает свойством многослойного оптического фильтра. Опорный пучок лучей лазера, служащий для восстановления изображения, попадая на плоскую голограмму, распадается на три пучка. (В действительности возникает еще несколько пучков, но они обычно очень слабы и не играют роли в формировании изображения.) Один из этих пучков является продолжением опорного. Он не имеет для нас никакого значения. Второй, идущий под углом к первому, состоит из расходящихся лучей. Они являются точной копией расходящихся лучей рассеянного света, исходивших от объекта в момент получения голограммы. Третий образует действительное изображение.

Большая интенсивность и высокая когерентность света лазеров позволили Лейту и Упатниексу расположить зеркало далеко от фотопластинки и так, что опорный пучок света, идущий от зеркала, падает на пластинку под углом к свету, рассеянному объектом. Благодаря этому при восстановлении голограммы действительное и мнимое изображения не накладываются друг на друга и не возникают искажения, свойственные первоначальному методу Габора.

Вот как рассказывал о голографии один из ученых, активно работающий над ее применением.

— Можно представить себе, — говорил он, — что лучи рассеянного света, которые при получении голограммы под действием опорного пучка были преобразованы в систему

стоячих волн, «вмерзли» в голограмму. А опорный пучок, применяемый для восстановления изображения, «разморозил» их, и световые волны как ни в чем не бывало побежали дальше. Если теперь они попадут в глаза наблюдателя, он увидит точно такую же картину, как если бы объект стоял на прежнем месте. Объект будет казаться находящимся за голограммой, как за окном. И, перемещая голову, наблюдатель сможет рассматривать его с различных точек зрения, получая полное впечатление объемности реального объекта. Изображение, конечно, мнимое. Поставив на место глаза экран, мы не увидим на нем изображения. Но его можно получить, поставив между голограммой и экраном выпуклую линзу. Перемещая линзу относительно экрана, можно получить резкие изображения различных частей объекта, совсем так, как это происходит в фотоаппаратах или при пользовании подзорной трубой.

— Но это не все, — продолжал он, — от голограммы исходит еще один пучок света, содержащий информацию об объекте. Он состоит из сходящихся лучей. Они сходятся в точках, расположенных перед голограммой строго симметрично тем точкам, где за голограммой сходятся несуществующие продолжения расходящихся лучей пучка, образующего мнимое изображение. Если заполнить дымом ту область пространства, куда направлены сходящиеся лучи, то действительное изображение появится во всей своей естественности. Оно будет казаться висящим в этой дымке. И если вы расположитесь относительно голограммы там, откуда можно сквозь голограмму видеть мнимое изображение, возникнет удивительная иллюзия. Переводя глаза от облака дыма с висящим в нем действительным изображением на голограмму, за которой видно мнимое изображение, вы будете чувствовать себя как перед зеркалом. Действительное изображение будет казаться реальным объектом, а мнимое — его зеркальным изображением.

Мало того. Если туда, где расположено действительное изображение, поместить белый экран, на нем возникнет яркое и четкое изображение. Немного перемещая экран к голограмме и от нее, можно делать резкими те или другие части изображения. И это при полном отсутствии линз! Ведь линзы не применяются ни при записи, ни при воспроизведении голограммы.

При использовании объемных голограмм Денисюка тоже можно получить действительное изображение. Нужно только направить на нее опорный пучок света в противоположном, чем раньше, направлении. Пустив дым туда, где раньше сквозь голограмму мы видели мнимое изображение, мы увидим теперь действительное. Видеть их одновременно, конечно, нельзя.

Несмотря на существенные преимущества объемных голограмм — возможность восстановления изображения в белом свете без использования лазеров и получения лишь одного изображения, а не нескольких, как в случае плоских голограмм, — плоские голограммы сейчас имеют более широкое применение. Это связано с чисто техническими причинами. Современные толстослойные фотоэмульсии заметно поглощают свет. Поэтому чем глубже слой эмульсии, тем меньше информации он получает, особенно о тех деталях объекта, которые освещены слабее или хуже отражают свет.

Для плоских голограмм применяются эмульсии, толщина которых меньше половины длины волны используемого лазера. Здесь поглощение, конечно, не играет существенной роли.

Потенциальные преимущества объемных голограмм, в особенности возможность концентрации огромных количеств информации в элементах малых размеров, стимулируют усилия с целью создания новых специальных фотоэмульсий и поиска новых процессов, позволяющих фиксировать информацию, содержащуюся в стоячих волнах.

Один из таких процессов — образование окрашенных центров в некоторых прозрачных кристаллах. Такие центры возникают в кристаллах под действием электронов или фотонов, обладающих достаточно большой энергией. Вероятность образования окрашенных центров при фиксированной энергии возбуждающего излучения пропорциональна плотности энергии излучения. В случае стоячих волн она больше в пучностях и меньше в узлах. Поэтому интенсивность окраски, как и интенсивность почернения фотоэмульсии, оказывается

пропорциональной интенсивности стоячей волны. Важным преимуществом такого метода является принципиальная возможность стирания полученной голограммы и многократного повторного использования кристалла. В некоторых кристаллах это достигается путем простого нагревания. К сожалению, такие кристаллы еще не нашли применения в практической голографии.

В глубину веществ

Современной голографии, основанной на применении лазеров, неизмеримо превосходящих по когерентности все другие источники света, всего восемь лет. Что же она уже может и что обещает в будущем?

Удивительно, но голография может успешно соревноваться с обычной фотографией, применяющей объективы, даже в ее коронной области — получении плоских черно-белых изображений. Возможности обычной фотографии ограничены в двух отношениях. Разрешающая способность, то есть способность воспроизвести отдельно две мелкие детали изображения, ограничивается и качеством объектива, и качеством фотоэмульсии. В лучшем случае изображение может содержать детали размером около сотой доли миллиметра. Иногда существенна и способность эмульсии воспроизводить градацию яркости объекта. Лучшие фотоматериалы позволяют воспроизводить не более ста ступеней между наиболее белым и наиболее темным участком изображения.

Разрешающая способность голограммы зависит главным образом от ее размера, который, в свою очередь, может быть ограничен свойствами источника света. Однако в настоящее время предел разрешающей способности голограммы определяется не этим, а свойствами фотоэмульсии, на которых фиксируется голограмма. Сейчас существуют фотоэмульсии с разрешающей способностью до 10 тысяч линий на один миллиметр. Их чувствительность очень мала, так что приемлемые длительности экспозиции могут быть достигнуты только при применении лазеров.

Для многих применений чрезвычайно важно, что при голографической записи каждая точка голограммы получает информацию одновременно о всех точках объекта. Затем при восстановлении изображения каждая точка голограммы участвует в формировании каждой точки изображения, а значит, любая точка изображения синтезируется при помощи всей голограммы. Именно благодаря этому голография может реализовать рекордную разрешающую способность и передать в сто раз более подробную градацию тонов, чем это возможно для двух соседних точек фотоэмульсии. Конечно, для того чтобы воспользоваться всем богатством полутонов, записанных на голограмме, не стоит и пытаться воссоздать изображение на фотобумаге. Мы уже знаем, что фотобумага не способна к этому, и весь выигрыш будет потерян. К сожалению, впредь до разработки новых фотоматериалов богатство полутонов, записанных на голограмме, может быть реализовано лишь в научных целях, когда изображение исследуется при помощи соответствующих фотоприемников.

Чем меньший кусок голограммы используется для восстановления изображения, тем беднее гамма яркости, тем меньше разрешающая способность. Однако даже очень малая часть голограммы способна образовать изображения всего объекта целиком, хотя эти изображения содержат все меньше деталей и становятся все более однотонными по мере уменьшения площади использованной голограммы.

Естественно считать, что ближе всего к фотографии примыкает кино и телевидение, и попытаться применить к ним методы голографии. Голографическое кино уже существует, правда, оно применяется пока лишь в исследовательской работе. Малая длительность вспышек лазеров, дающих гигантские импульсы, — несколько стомиллионных долей секунды — позволяет фиксировать мгновенное распределение и движение пылинок, капелек дождя и тумана в воздухе, твердых частичек в струе газов ракетных двигателей, пузырьков и мелких организмов в потоках воды. Прокручивая кадры голограммы в медленном темпе или

даже останавливая их, можно подробно изучать объемное распределение важнейших деталей, производить точные измерения или другие наблюдения, недоступные в естественных быстротечных процессах.

На пути к созданию художественных голографических кинофильмов стоят чисто технические трудности, связанные с необходимостью применения сверхъярких лазеров и созданием специальных киноплёнок. Преодоление их — вопрос времени.

Огромный объем информации, записанной на голограмме, сильно затрудняет ее передачу по телевизионному каналу. Расчет показывает, что для этого нужно увеличить полосу телевизионного канала в сотни раз. Такое возможно лишь при переходе телевидения по крайней мере в диапазон миллиметровых радиоволн. Но и в этом случае необходимо радикально уменьшить диаметр электронного пучка в приемных и передающих телевизионных трубках и усовершенствовать покрытие экранов трубок.

Однако уже зарубежные опыты передачи отдельного неподвижного голографического изображения показали необычайную помехоустойчивость системы. Изображение воспроизводилось с минимальными искажениями даже тогда, когда связь не нарушалась помехами лишь 10 процентов полного времени передачи!

Первые шаги голографии были связаны с микроскопом. Электронная микроскопия достигла высокого совершенства и без применения голографии. Это отчасти лишило голографию одного из стимулов развития в первые годы ее существования. Однако возможности реализации объемного изображения вновь привлекли лазерную голографию к задачам электронной микроскопии.

По-видимому, наибольшие перспективы голографического микроскопа лежат в области ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, где невозможно применение линзовой техники. Ведь большинство материалов непрозрачны для коротких ультрафиолетовых лучей и практически не искривляют пути распространения рентгеновских лучей. Но пока не существует рентгеновского лазера. Нет достаточно мощных лазеров в диапазоне коротких ультрафиолетовых лучей. Поэтому реализация потенциальных преимуществ голографического микроскопа — дело будущего.

Наибольшее практическое применение голография получила в технике и в исследовательской работе. Например, при изготовлении точных деталей сложной формы — лопаток турбин, корабельных винтов и т.п. — контроль изделий занимает значительную часть времени, требует сложных приспособлений и высокой квалификации. Если лазерный свет, отраженный от изделия, пропустить через голограмму, полученную при помощи шаблона, то отступление размеров изделий на долю длины волны от размеров шаблона приведет к появлению на экране интерференционных полос. Число и расположение этих полос характеризуют отступление размеров изделий от расчетной величины. Особенно удобна возможность непрерывного визуального контроля для процесса окончательной доводки размеров изделия. Поверхность изделия вовсе не должна быть полированной, как при прежних методах оптического контроля.

Во многих случаях нет необходимости даже в изготовлении шаблона. Голограмму можно сделать просто по чертежу изделия или даже на основе математической формулы, описывающей форму поверхности изделия.

Пропуская лазерный свет, рассеиваемый какой-либо деталью работающей машины, через голограмму неподвижной детали, можно обнаружить вибрации и ничтожные деформации детали. И на деталь не надо действовать ничем, кроме света.

Голографические методы уже успешно применяются в звуковидении и радиолокации. Если предмет, погруженный в прозрачную жидкость, облучается потоком звуковых или ультразвуковых волн так, что рассеянные им волны попадают на поверхность жидкости, на ней возникает рябь. Если на поверхность одновременно попадает и волна, идущая непосредственно от источника, то рябь на поверхности превращается в систему неподвижных стоячих волн. Они содержат информацию о форме предмета и о механических свойствах его поверхности. Облучая эти стоячие волны светом лазера, можно увидеть

глазами изображение объекта, скрытого в жидкости. Аналогично можно исследовать раковины и другие включения внутри металлических или цементных блоков и в других непрозрачных твердых телах.

Раскрытие образа

Наиболее распространенные радиолокаторы ощупывают пространство узким пучком радиоволн. Изображение цели на окружающем фоне воссоздается на трубке радиолокатора по точкам, подобно тому, как воспроизводится изображение в телевизоре.

В последнее время задачи радиолокации усложняются. Необходимо одновременно следить за многими целями, быстро перемещающимися в больших областях пространства. Обычный одноантенный радиолокатор достиг предела своих возможностей. Появились сложные многоэлементные системы. Чрезвычайно возрос объем поступающей информации. Методы голографии позволяют и здесь добиться хороших результатов.

Неисчерпаемые возможности голография открывает в области вычислительных машин и других систем накопления и обработки информации. Расчеты показывают, что плоская голограмма на пластинке размером 7 на 7 сантиметров вмещает 100 миллионов единиц информации, что соответствует библиотеке из 300 книг по 200 страниц каждая.

Объемная голограмма способна сосредоточить миллион миллионов единиц информации в одном кубическом сантиметре. Задача состоит в том, чтобы удобно и быстро осуществить такую запись и, что особенно сложно, быстро извлечь из этой массы нужную информацию.

Огромным преимуществом голографической записи является замена последовательного поиска, применяемого в других системах (перелистывание страниц, просмотр оглавления и библиографических карточек, прокручивание магнитных пленок), одновременным анализом всего блока памяти.

Например, метод, иногда называемый методом фантомных изображений, действует так. Информация, например страницы книги последовательно вводится в голограмму — блок памяти. При этом часть каждой страницы отводится для записи ключевых данных — например, название книги, автор, номер страницы. На стадии восстановления изображения луч лазера, направленный на голограмму, предварительно проходит через ключевую карточку — пластинку, на которой нанесены ключевые данные нужной страницы. На экране немедленно возникает изображение всей страницы. Существующая техника позволяет достаточно четко восстановить содержание страницы, даже если лишь 2 или 3 процента ее площади использовать в качестве ключа поиска. Это, конечно, значительно упрощает процесс. Но ученые хотят достичь много большего сжатия информации.

Более эффективным является метод, аналогичный ассоциативной памяти. Большой объем голографических систем памяти вместе с применением ассоциативной методики позволит в будущем создать машину для перевода, хранящую в «словаре» не отдельные слова, а целые фразы. В блок записывается информация о связи входного сигнала (например, определенной фразы русского языка) с выходным сигналом (соответствующим фразе иностранного языка). В выходной блок записываются лишь выходные данные, в нашем примере — множество иностранных фраз. На стадии восстановления информации выходной блок освещается лучом лазера, проходящим через блок памяти. При отсутствии входного сигнала на экране за выходным блоком имеется только слабое равномерное освещение. Если же, кроме опорного луча, на блок памяти падает вторая часть луча того же лазера, предварительно пропущенная через пленку, на которой записана русская фраза, то на экране немедленно появится ее иностранный эквивалент. Если соответствующая русская фраза и ее иностранный эквивалент не были первоначально введены в систему, на экране не возникнет никакого изображения.

Пока такой машины не существует, но создание ее требует лишь преодоления

технических трудностей. И можно создать в такой машине возможность приближенных переводов фраз, интересующих абонента, даже если эти фразы не были введены в ее память.

Методы, кратко описанные выше, позволяют производить не только быстрый поиск, но и обработку информации, например, осуществлять математические и логические операции, опознавать различные образы: разыскивать фотографии, на которых присутствует определенное лицо, или производить анализ крови или отпечатков пальцев, и многое другое.

В последнее время разработаны специфические методы голографии, позволяющие обходиться без источников когерентного излучения. Они представляют собой в некотором смысле возврат к липмановским фотографиям, но на более высоком уровне и без применения линз. В методе Липмана интерференционная структура возникала при взаимодействии некогерентного света, прошедшего через объект, с лучами того же света, отразившимися от зеркала, примыкающего к фотоэмульсии. В современной некогерентной голографии некогерентное излучение, прошедшее объект, расщепляется дифракционной решеткой. Два главных пучка, образованных решеткой, направляются на голограмму при помощи двух вспомогательных зеркал. Этот метод применим и к рентгеновским лучам, и даже к гамма-лучам в эффекте Мессбауэра.

Современная голография — дитя лазера. Она уже вышла из пеленок и стала средством быстрого прогресса науки и техники. Мы еще услышим о многих чудесах, превращенных голографией в реальность.

Мы увидим

Я познакомилась с Денисюком в марте 1971 года, когда он впервые присутствовал на собрании Академии наук после его избрания членом-корреспондентом.

— В наши дни многие придают чрезмерное значение вопросам приоритета, — сказал Денисюк. — Конечно, голографию придумал и впервые доказал ее осуществимость Габор. Но я рад, что узнал о его работах, когда сам уже сформулировал свой метод и получил свои результаты. Как знать, пойдя я каноническим путем, начав с изучения литературы, не попал бы я в плен идей Габора и смог ли прийти к идее объемной голографии?

— Ведь подход у нас был близким, цели одинаковыми, — продолжал он, — а обнаружив в журнале готовое решение, поневоле размагничиваешься. Кто знает, прочитай я годом-двумя раньше статьи Габора, и объемную голографию пришлось бы придумывать другому, и, может быть, это произошло бы много позже. Насколько я знаю, Габор хорошо понимает различие между нашими направлениями и всегда ссылается на мои работы по объемной голографии. А я, конечно, всецело признаю его приоритет и его заслуги, так же как и заслуги Лейта в создании плоской лазерной голографии...

Впрочем, коснувшись вопросов истории, не следует забывать, что и у Денисюка и у Габора были предшественники. Габор указывает, что его метод возник, как модификация идеи У. Брэгга, крупнейшего специалиста по рентгеноструктурному анализу.

Но ни Габор, ни Денисюк ничего не знали о трудах польского физика Мечислава Вольфке, сформулировавшего принцип двухступенного восстановления изображения объекта, при котором используется дифракционная картина, образуемая этим объектом. Свою идею Вольфке, как и Габор, сформулировал применительно к рентгеновским лучам и проверил на опыте в видимом свете. Соответствующие публикации появились в 1920 году. Они опирались на теоретические работы автора, выполненные между 1911 и 1914 годами, причем эти исследования опирались на труды знаменитого иенского оптика Эрнста Аббе и его теорию микроскопа. Вольфке указывает, что к идее восстановления изображения подходил в 1913 году и Э. Хупка. Еще раз, не зная о предшественниках, подобную идею высказал в 1938 году Х. Берш.

Все они были пионерами, далеко опередившими возможности и даже потребности своего времени.

Меня же интересовал не только вопрос приоритета.

— Говорят, что голография — дитя лазера. Правильно ли? Ведь и вы и Габор получили свои голограммы до появления первых лазеров, — спрашиваю я.

— Тем не менее, это верно, — ответил Денисюк. — Без лазеров голография осталась бы интересным принципом, может быть, имеющим узкое применение в каких-то специальных исследованиях. Лазеры вдохнули в голографию новую жизнь. Открыли ей многочисленные пути в практику. Привлекли к ней внимание ученых и инженеров, да и всей читающей публики. Для меня голография не только область науки, но и основа для размышлений. Судите сами: стремление запечатлеть окружающий мир — одно из наиболее характерных проявлений разума. Обезьяна иногда пользуется палкой — простейшим орудием. Но только человек научился рисовать. Современным людям живопись кажется оторванной от практики, она выступает лишь как эстетическая ценность. Но в далекой древности люди отождествляли изображение с объектом. Рисунки имели магический смысл. Рисунок, живопись явились первым методом описания, а отчасти и познания окружающего мира. Этому методу не хватает точности, свойственной математике, но он вне конкуренции по непосредственному воздействию на наши чувства, на наши мысли. Мы не знаем, как мозг распознает образы, но самая совершенная электронная машина не может пока и в слабой степени приблизиться в этом к мозгу. Несомненно, что именно рисунки постепенно стали основой пиктографической письменности, а потом превратились в иероглифы и, наконец, в буквы современных алфавитов. Нет, конечно, голография не заменит письменность. Но она позволит достичь наиболее компактной записи больших объемов информации... Есть еще одна очень интересная область, примыкающая к голографии. Некоторые физиологи предполагают, что процесс формирования образов в коре головного мозга в чем-то аналогичен образованию голограммы. В самом деле, мозг очень устойчив против повреждений. Создается впечатление, что запоминание образа происходит в нем не локально, не в определенных клетках, а глобально — все или большинство нейронов участвуют одновременно в этих процессах. И, отсекая отдельные участки коры головного мозга, мы не уничтожаем полностью какую-то часть запомненного, а лишь уменьшаем количество деталей. Ведь и в мельчайшем осколке голограммы хранится образ всего объекта, но чем меньше оставшийся кусок голограммы, тем менее подробно воспроизводится объект. Конечно, аналогия не означает тождества. Но какую-то часть истины исследователю она, несомненно, дает.

— Юрий Николаевич, — сказала я, — известно, что животные не воспринимают фотографии. Собака узнает голос хозяина, записанный магнитофоном, но не реагирует на его портрет. Как она отнесется к его голографическому изображению?

— Не знаю, проводил ли кто-либо такой, опыт. Не сомневаюсь, что собака узнает хозяина по его голограмме. Фотография в значительной мере условна. Для ее восприятия нужен определенный уровень интеллекта, нужна тренировка. А голограмма дает полный и объективный образ объекта. Она решает даже более сложную задачу автоматического распознавания образов. Мы уже можем получать голографические портреты людей при вспышке лазера. Остается провести интересующий вас эксперимент... Мне кажется, — сказал в заключение Денисюк, — что создать объемное голографическое кино и телевидение труднее, чем решить многие чисто технические задачи. Но мы с вами еще успеем увидеть и то и другое.

Глава VIII. Квазиоптика

Филология и математика

«Квази» — часть сложных слов, означающая «якобы», «мнимый», «ненастоящий»,

например, квазиученый, квазиспециалист.

Возможно, что ученый, введший в употребление термин «квазиоптика», не знал латыни. На мысль об этом наводит Большая Советская Энциклопедия, откуда выписано определение столь непривлекательного смысла приставки «квази».

В действительности квазиоптика — самая настоящая оптика, которой оказалось недостаточно ее традиционных владений, области видимого света, и она присоединила к ней все, вплоть до области сантиметровых радиоволн. Но, проявив себя столь агрессивной по отношению к соседям, квазиоптика не распространяет своих амбиций на всю многоэтажную конструкцию, выросшую на фундаменте, заложенном Декартом, Ньютоном, Гюйгенсом и Френелем. Она не интересуется ни природой спектров, ни спектральным анализом, ни процессами поглощения и рассеяния, ни сложными взаимоотношениями оптики с другими областями науки.

Квазиоптика поставила перед собой, казалось, неразрешимую задачу примирить вечно враждующих антиподов — оптику волн и оптику лучей, волновую оптику и геометрическую оптику. Впрочем, можно согласиться и с противоположной точкой зрения: квазиоптика родилась от союза геометрической оптики с волновой.

Геометрическая оптика в своем названии выражает потрясающую способность математики, в частности геометрии, выражать закономерности явлений, отвлекаясь от их конкретной физической сущности.

Великий геометр древности Эвклид мог пользоваться законом отражения света, не зная ничего о природе света. Он видел свет и тени. Знал, что отверстие в ставне выделяет из всей массы света один луч. Мог убедиться в том, что луч отражается от пластинки металла или поверхности воды под тем же углом, под которым он падает. Этого хватило на века.

Снеллиус и Декарт через полторы тысячи лет установили закон преломления света. Вопрос о том, почему свет преломляется так, а не иначе, волновал самых крупных физиков. Ньютон ожесточенно спорил с Гуком и Гюйгенсом, много позже — Био спорил с Френелем, Лоренц с Максвеллом...

Но математикам до этого не было никакого дела. В их руках было два закона. Почему они таковы, что лежит в их основе — несущественно для математиков. Важно, что закон отражения и закон преломления отображают свойства природы, верно описывают какой-то круг взаимодействий света и вещества. Исходя из них, математики могут и должны построить методы, позволяющие извлечь все следствия из этих законов, рассчитывать линзы для очков и телескопов, создавать микроскопы и волшебные фонари.

Величайшие математики Гамильтон, Гаусс и многие другие вложили свой вклад в создание и развитие геометрической оптики. В наш век, век узкой специализации, появились специалисты по расчету оптических приборов, основным орудием которых стала геометрическая оптика. По существу, они являются математиками. Из всей остальной физики они применяют только закон дисперсии, описывающий зависимость показателя преломления от частоты. Почему зависимость такова — их не интересует. Такова природа, рассуждают они, занятые своей работой, и учитывают это, подбирая стекла различных сортов.

Конечно, после торжества френелевской волновой теории ни один образованный человек не рискнул бы ее отрицать. Да и поклонники геометрической оптики не пытались описать своими методами все явления, возникающие при взаимодействии двух лучей света, или способность света огибать препятствия. Более того, проектировщики, завершающие расчет телескопа или микроскопа, вынуждены прибегать к волновой теории для того, чтобы оценить разрешающую способность своего прибора. Ибо они знают, что именно явление дифракции ограничивает размеры мельчайших деталей, которые можно еще различить при помощи микроскопа, или определяет условия, при которых большой телескоп обнаружит две близких звезды там, где меньший изображает их как одну светящуюся точку.

Рассвет

Оглядываясь назад с высоты сегодняшней науки, можно, таким образом, проследить истоки союза геометрической и волновой оптики очень далеко и отнести рождение квазиоптики к первой половине прошлого века.

Более того, на заре волновой оптики великий Гюйгенс, не придя еще к представлению о свете как о периодических волнах, рисовал картину волновых фронтов и таким путем не только получил законы отражения и преломления, но строил форму поверхностей зеркал и линз. При этом он пользовался циркулем и линейкой, так что оптику Гюйгенса следовало бы называть «геометрической оптикой», а не волновой. Но обычаем сильнее логики.

Все величие Гюйгенса, сочетавшего в себе мощь теоретика со стремлением к немедленному получению практических результатов, видно из следующего отрывка, начинающего шестую главу его «Трактата о свете».

«После того как я объяснил, как вытекают свойства отражения и преломления прозрачных и непрозрачных тел из наших предположений о природе света, я дам здесь весьма простой и естественный способ, позволяющий из тех же самых принципов вывести правильные формы для тел, которые посредством отражения или преломления собирают или соответственно желанию рассеивают лучи света. Правда, я еще не вижу, чтобы было можно пользоваться этими формами для преломления, с одной стороны, вследствие трудности придать с требуемой точностью нужную форму стеклам зрительной трубки, а с другой — потому, что в самом преломлении заключается одно свойство, которое, как это хорошо было доказано с помощью опытов Ньютоном, препятствует совершенно правильному соединению лучей. Все же я приведу здесь исследование этих форм, так как оно напрашивается здесь, так сказать, само собой и так как то согласие, которое здесь обнаруживается между лучом преломленным и отраженным, еще раз подтверждает нашу теорию преломления. Кроме того, может случиться, что для них в будущем будут открыты полезные применения, еще неизвестные теперь».

Дальше, простыми построениями Гюйгенс находит форму фокусирующего зеркала — параболу и получает главные свойства линз, в том числе и ранее установленные Декартом.

В приведенном отрывке содержатся две мысли, характерные для склада ума автора. Он сознавал, что точность его геометрических построений выше практических возможностей того времени. Впрочем, он достиг в шлифовке стекол высшего искусства, своими руками изготовил телескопы огромных для того времени размеров.

Второе замечание относится к Ньютону и его опытам по дисперсии. Гюйгенс безоговорочно принял ошибочный вывод Ньютона о том, что дисперсия света «препятствует совершенно правильному соединению лучей».

Впрочем, заблуждение Ньютона и Гюйгенса продержалось в науке еще много лет, пока скромный оптик Доллонд не уничтожил препятствие, казавшееся им непреодолимым. В результате многолетних трудов ему удалось достигнуть цели и, соединив линзу, изготовленную из кронгласа, с линзой из флинтгласа, получить изображение, не испорченное радужными цветами, смазывающими в обычных линзах границы изображения. Доллонд нашел форму поверхностей, при которых искажения, вносимые обеими линзами, противоположны и хорошо компенсируют друг друга.

Волновая теория света в принципе способна справиться с расчетами любых оптических приборов. Но во многих случаях необходимые вычисления оказываются чрезвычайно сложными и очень громоздкими. Могучая волновая оптика требует от ученого огромных усилий там, где примитивная геометрическая оптика указывает простой и короткий путь.

Математики не могли оставить без внимания эту странную ситуацию. Им удалось выяснить, в чем здесь дело. Оказывается, в случаях, когда размеры оптических приборов — размеры линз или зеркал, призм или диафрагм и расстояния между ними — много больше длины световых волн, законы геометрической оптики являются простым математическим

следствием волновой природы света. Только более сложные проблемы, о которых уже упоминалось выше, — вопрос о минимальном расстоянии, на котором изображения двух близких точек не сливаются в одну, и некоторые другие — требуют проведения точных вычислений на основе волновой теории.

С тех пор в науке и технике, в оптике и ее многочисленных применениях возник отчетливый рубеж. По одну его сторону располагаются задачи, доступные геометрической оптике, решать которые волновыми методами столь же нелепо, как излагать стихами поваренную книгу. По другую его сторону находятся более сложные проблемы, требующие применения всего арсенала современной оптики. Всякая попытка недоучек перенести методы геометрической оптики за эту границу, в область, где пренебрегать волновыми свойствами света нельзя, приводит к нелепостям, к кажущимся парадоксам, при помощи которых молодые преподаватели любят смущать юных студентов. Имеется, однако, приграничная полоса, в нее с трудом проникают приверженцы крайностей. Это зона компромисса. О ней позже.

Рядом с границей

Радиоволны по сравнению с оптическими имеют огромную длину. Если же отвлечься от сравнений, то придется признать, что длины волн, применяемых современной радиотехникой, лежат в чрезвычайно широких пределах. В системах радионавигации и для передачи сигналов точного времени иногда применяются радиоволны длиной в десятки километров. Радиовещательные станции в наши дни не пользуются волнами длиннее двух километров и короче десяти метров. Внутри этих границ они оставляют свободными лишь несколько участков для технических нужд — для сигналов судов, терпящих бедствие, для систем связи, для радиоастрономов. Телевидение и высококачественное музыкальное вещание проникли в метровый и дециметровый диапазоны.

Теснота в эфире теперь столь велика, что потребовались международные соглашения для мало-мальски приемлемого распределения дефицитных радиоволн.

Традиционные радиоволны сильно превосходят по длине размеры деталей аппаратуры. Радиоволны соизмеримы лишь с самыми крупными из них — антеннами. Не удивительно, что радиоинженеры при расчетах аппаратуры долгое время обходились чисто электротехническими методами, а при проектировании антенн должны были учитывать явление дифракции.

Иногда, особенно при работе на коротких волнах, радиоприему мешает интерференция. Так возникают замирания приема, вызываемые наложением нескольких радиоволн, дошедших до приемника различными путями.

Радиолокация почти монополюсно завладела сантиметровыми и миллиметровыми волнами. Но постепенно в ее вотчину проникают новейшие системы многоканальной связи.

Сантиметровые радиоволны настолько короче расстояний между приемником и передатчиком или между радиолокатором и целью, что невольно возникал соблазн применить здесь законы геометрической оптики. Однако поперечные сечения металлических труб — волноводов — и даже размеры антенн в этом диапазоне все еще соизмеримы с длиной волны, и волновая природа проявляет себя в полной мере. Лишь простейшие оценки могут быть выполнены здесь на основе геометрического подхода.

Но переход к миллиметровым и субмиллиметровым волнам привел к перелому. Трудности изготовления волноводов малого сечения и большое поглощение энергии радиоволн в их стенках заставили инженеров перейти к применению волноводов большого сечения, поперечные размеры которых составляют много длин передаваемых по ним радиоволн. Пришлось прибегнуть к зеркалам, линзам, диафрагмам и призмам, до тех пор бывшим достоянием оптики.

Радиоинженеры и радиофизики, привыкшие пользоваться волновой теорией и

волновыми методами расчета, встретились со всеми трудностями, возникшими в свое время перед апостолами волновой теории, а впоследствии ставшими на пути ее адептов, когда они пытались навязать методы волновой оптики проектировщикам оптических приборов. Расчеты становились слишком громоздкими. Но применить методы геометрической оптики тоже было невозможно. Они приводили к недопустимо большим погрешностям, ибо явления дифракции и интерференции играли здесь весьма существенную роль.

Так возникли квазиоптические методы расчета, приспособленные к тому, чтобы, рассчитывая действие таких исконно оптических деталей, как зеркала и линзы, сразу учитывать влияние дифракции на их краях. С этой целью теоретики применили весь арсенал уравнений волновой оптики, модифицировав его путем применения методов, которые математики называют асимптотическими.

Это один из мощных путей получения приближенных расчетных формул, основанных на разумном учете каких-либо масштабных характеристик задачи. В данном случае такой характеристикой явилось отношение размеров аппаратуры к длине волны.

Впрочем, не менее законным был бы путь обобщения методов геометрической оптики. Такие попытки уже делались и, несомненно, будут продолжаться. Их успех позволил бы найти новое применение громадному арсеналу геометрической оптики.

Так, радиоспециалисты создали для своих нужд линзы из веществ, не пропускающих света, зеркала, покрашенные черным лаком для защиты их поверхности от коррозии, и другие аналогичные детали. Детали оптические и одновременно не оптические. Радиоспециалисты называли их квазиоптическими, почти оптическими. Это отвечало сути дела и не содержало ни иронии, ни осуждения, якобы вытекающего из определения, принятого для приставки «квази» энциклопедией. Так возникли квазиоптические методы, приспособленные для решения задач, возникающих на границе областей, неподвластных геометрической и волновой оптике, где первая приводит к недопустимым ошибкам, а вторая требует слишком громоздких вычислений.

Лазеры

Когда рождались лазеры, Т. Мейман и А. Джаван ничтоже сумняшеся применили в своей пионерской работе плоские зеркала. Они должны были лишь изготовить их более тщательно, чем это делалось до того. Никаких расчетов не делали, полагаясь на авторитет Таунса (может быть, они читали и статьи Прохорова). Оптический резонатор из двух плоских зеркал был простейшим способом для осуществления обратной связи, без которой не может работать оптический квантовый генератор. (В этом месте пришлось отказаться от термина «лазер», ибо он имеет и второе значение — оптический квантовый усилитель, прибор, обычно не требующий применения оптического резонатора.)

Однако с развитием лазеров «метод тыка», как иногда называют чисто эмпирический подход, оказался недостаточным. Для того чтобы понять процесс работы лазера, потребовалось выяснить особенности оптических резонаторов.

При этом сразу выяснилось, что, несмотря на размеры резонаторов, на много порядков превосходящие длину световых волн, методы геометрической оптики к ним неприменимы. А методы волновой оптики приводили к расчетам, посильным лишь электронным машинам.

Американские исследователи А. Фокс и Т. Ли первыми взялись за исследование оптического резонатора. Они отлично понимали, что расчеты оптического интерферометра Фабри — Перо, по существу не отличающегося от резонатора лазера, здесь непригодны. Дело в том, что применение интерферометра Фабри — Перо в классической оптике предусматривает освещение его извне световыми волнами, плоские фронты которых падают на интерферометр параллельно его зеркалам. В интерферометре возникает система стоячих плоских волн. Кроме того, в оптических интерферометрах поперечные размеры зеркал обычно превосходят расстояние между ними.

В лазере ситуация полностью меняется. Энергия не поступает в его резонатор-интерферометр извне. Она выделяется внутри его. Причем процесс самовозбуждения лазера состоит в том, что случайно возникшая в нем слабая волна постепенно усиливается внутри резонатора в результате многочисленных пробегающих от одного зеркала к другому и обратно. А расстояние между зеркалами много больше, чем их размеры.

Фокс и Ли задалась целью проследить за тем, что происходит со световой волной, бегающей между зеркалами. Для упрощения задачи они отказались на этой стадии от рассмотрения самой активной среды лазера и считали зеркала идеальными, то есть отражающими свет без потерь.

Замечательно, насколько постановка задачи Фокса и Ли совпадает со старым подходом Гюйгенса: между зеркалами бежит световой импульс, волновая сущность света отступает на второй план. Естественно, что их расчет основан на простейшей математической формулировке принципа Гюйгенса. Дальше они применяют известный интеграл Френеля и... приходят к сложным интегральным уравнениям. Решений этих уравнений нет ни в одной книге по математике, ни в одном математическом журнале.

Живи Фокс и Ли во времена Френеля, это было бы тупиком. Но шло шестое десятилетие нашего века, и они обратились к помощи вычислительной машины. Машине предложили несколько вариантов задачи — плоские зеркала в виде круглых дисков или в виде узких полос и вогнутые зеркала с различным фокусным расстоянием. Машина IBM-704 шаг за шагом проследила за тем, как деформируется волна по мере увеличения числа проходов, и показала, что через несколько сот таких прохождений форма волны практически перестает изменяться.

Далее машина уточнила, что оптический резонатор выделяет из всего мыслимого разнообразия волн лишь определенный набор, соответствующий частотам, характерным для данного резонатора. Машина выдала свой ответ в виде численных таблиц и графиков. Но ученые мирятся с такими ответами только за неимением более удобных ответов, имеющих вид известных математических функций. Ученые привыкли к функциям в результате трехвековой тренировки, передаваемой от учителя к ученику, от поколения к поколению. Не удивительно, что они стремились найти подобное решение и для этой задачи.

Первыми нашли такое решение для одного частного случая Дж. Бойд и Дж. Гордон. Они рассмотрели вогнутые зеркала, фокусы которых совпадают. При этом принцип Гюйгенса приводит к интегральному уравнению, решение которого известно.

Колебательный подход

Существенный сдвиг в теорию лазерных резонаторов внес профессор Лев Альбертович Вайнштейн, ныне член-корреспондент Академии наук СССР, один из крупнейших специалистов в области математической физики. Вайнштейн начал свою научную работу под руководством академика М.А. Леонтовича и от него воспринял передовые традиции школы Мандельштама — Папалекси. Для формирования научного стиля молодого теоретика было очень важно то, что он многие годы, с начала своей научной работы, трудился в институте, основанном академиком А.И. Бергом, и приобрел в нем вкус к решению конкретных задач, вытекающих из потребностей практики. Работая в тесном контакте с инженерами и физиками-экспериментаторами, Вайнштейн стремился и научился приводить свои результаты к виду, доступному для практиков и удобному для проведения конкретных расчетов. К началу лазерной эры Вайнштейн уже выдвинулся в ряды ведущих специалистов в области теории волноводов и резонаторов, в области электродинамики сверхвысоких частот. Многие квазиоптические методы, предназначенные для исследований в сантиметровом и миллиметровом диапазоне радиоволн, созданы им или получены на основе его результатов.

Работа, ставшая темой докторской диссертации Вайнштейна, составила целую эпоху в

области теории волноводов. Ему впервые удалось решить задачу об отражении электромагнитной волны от открытого конца волновода. В то время задача казалась интересной только узкому кругу специалистов.

О волноводах и резонаторах нам, студентам радиотехнического факультета, в начале 50-х годов преподаватели рассказывали как о самом важном достижении предшествующих лет. И мало кто из оканчивающих рисковал брать темой дипломных проектов расчет этих сложных непривычных узлов радиоаппаратуры.

Издательства не решались взяться за выпуск работы Вайнштейна, считая, что она не разоидется, и боясь понести убытки. Лишь незадолго до того созданное по инициативе Берга издательство «Советское радио» пошло на риск, согласившись издать ее небольшим тиражом. Книга исчезла из магазинов моментально.

Дело, конечно, не в новизне самого явления.

Процесс отражения волны от открытого конца волновода в принципе не отличается от отражения света, выходящего из стенки аквариума в воздух. И здесь и там играет роль лишь скачкообразное изменение свойств среды, в которой бежит волна. Подобный процесс возникает и при движении в трубах звуковых волн. Особенно подробно все это применительно к органам труб изучил знаменитый Рэлей. Но его задача была много проще. Ведь звук — это волны сжатия и разрежения, продольные волны. Кроме того, длина звуковых волн много больше диаметра органных труб, в которых они возбуждаются. А радиоволны, как и свет и все другие электромагнитные волны, являются поперечными. Изучая их, необходимо учитывать их поляризацию. В результате при решении той же задачи обычно приходится иметь дело с втрое большим числом уравнений.

Трудности сильно возрастают и потому, что длина радиоволн, с которыми имел дело Вайнштейн, близка к ширине волновода. В результате он не имел права пренебрегать ролью дифракции радиоволн при их выходе из конца волновода. Для того чтобы справиться со всеми осложнениями, нужен особый подход. Этот подход и разработал Вайнштейн. И его значение выходило далеко за пределы конкретной задачи об открытом конце волновода, для решения которой он был создан.

В дальнейшем Вайнштейн и его сотрудники изучили множество сложнейших проблем, возникавших перед экспериментаторами или являвшихся логическим продолжением их предыдущих работ. Естественно, что к началу лазерной эры они были полностью готовы к переходу от квазиоптических задач радиотехники к исследованию сложных проблем, возникавших в оптических резонаторах, размеры которых потрясающе велики по сравнению с длиной световых волн.

Вайнштейн назвал их открытыми резонаторами, подчеркивая этим, что основное отличие заключено не в размерах, а в том, что электромагнитное поле в резонаторах удерживается внутри, несмотря на то, что зеркальные стенки составляют лишь малую часть поверхности, внутри которой замкнута энергия поля. Принципиальное отличие яснее всего бросается в глаза специалисту в области сантиметровых радиоволн, привыкшему иметь дело с резонаторами в виде замкнутых металлических полостей. Для связи с внешним миром в стенках полостей могли оставаться лишь малые отверстия или узкие щели. Иначе качество резонатора — его добротность — катастрофически ухудшалось.

Как ни парадоксально, открытые резонаторы связаны с внешним миром отнюдь не через свои открытые стенки. Наоборот, открытые стенки являются непреодолимой преградой для тех электромагнитных волн, которые возбуждаются в резонаторе. Для связи с внешним пространством одно из зеркал обычно делается полупрозрачным или, реже, в нем оставляется небольшое отверстие, как в стенке объемного металлического резонатора сантиметрового диапазона.

Удивительная способность незримой — «воображаемой» — границы открытого резонатора удерживать электромагнитные волны весьма близка тому, что заставляет эти волны отражаться от открытого конца волновода. Общность столь велика, что Вайнштейн смог достаточно подробно рассмотреть свойства оптического резонатора, представив его

зеркала кусками стенок очень короткого волновода, лишенного второй пары стенок. Оказалось, что существует целый класс волн, практически полностью отражающихся от обоих концов этого удивительного волновода и образующих между его «стенками» — зеркалами — систему стоячих волн. Такие стоячие волны, по существу, совпадают с теми, которые электронная машина IBM-704 отобрала при решении задачи Фокса и Ли.

Так глубокая физическая интуиция и общий «колебательный» подход позволили Вайнштейну распространить квазиоптические методы электродинамики сверхвысоких частот на чисто оптическую задачу лазерной оптики. Но пример, приведенный выше, лишь один из многих. В специальной книге Вайнштейна «Открытые резонаторы и линии передачи» дана общая теория открытых систем и рассмотрены многие ее практические приложения.

Под землей

Открытые линии передачи тоже пришли в оптику из техники сантиметровых радиоволн. Наиболее известными являются радиорелейные линии связи, состоящие из специальных антенн, установленных на высоких мачтах, передающих друг другу узкий пучок радиоволн. Между передающей радиостанцией и первым ретранслятором могут пролегать десятки километров. Поэтому до ретранслятора доходит лишь малая часть переданной энергии. Приемная антенна ретранслятора передает поступивший сигнал в усилитель, а вторая, передающая, антенна направляет его дальше. Так огромными шагами радиосигналы уходят на тысячи километров. Иногда, например, при переходе через горы, когда уход за усилительной аппаратурой затруднен и сложно обеспечивать ее электроэнергией, применяют пассивные ретрансляторы. Просто пару зеркал, установленных так, что радиоволны, приходящие к ретранслятору, отражаются ими дальше в нужном направлении.

Зеркальные линии интенсивно изучались в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР под руководством профессора Бориса Захаровича Каценеленбаума. Здесь же получены существенные результаты по разработке зеркальных оптических линий связи. Такие линии обладают целым рядом преимуществ по сравнению с цепочками линз — линзовыми линиями связи, разрабатываемыми с этой же целью за рубежом.

Все размеры оптических линий связи: поперечные размеры зеркал или линз и, конечно, расстояния между ними — много больше длины световых волн. Казалось, здесь исконное царство геометрической оптики. Конечно, в общих чертах так. Но при применении и исследовании таких линий существенную роль играют потери передаваемой энергии, возникающие на краях зеркал и линз из-за явлений дифракции. Учесть их в рамках геометрической оптики невозможно. Но строгая волновая теория приводит в таких случаях к столь сложным и громоздким уравнениям, что решать их даже при помощи вычислительных машин оказывается неразумным. Здесь естественно применять квазиоптические методы, объединяющие методы волновой и геометрической оптики, позволяющие достаточно просто и точно изучать явления дифракции в длинных волновых пучках.

Оптические линии связи встречаются с трудностью, не играющей существенной роли для радиорелейных линий. Ведь световые волны полностью поглощаются туманом, дождем или снегопадом, не сказывающимися заметно на распространении радиоволн. Поэтому для защиты оптических линий от неблагоприятного влияния погоды их приходится заключать в трубы, а для предохранения труб от повреждения — закапывать в землю.

Естественно, возникает вопрос — почему не использовать в таких линиях сантиметровые радиоволны? Ответ прост. Для радиоволн нужно применять волноводы — металлические трубы с тщательно обработанными внутренними поверхностями. Работы в этом направлении ведутся, но трудности очень велики. В случае оптических линий металлические трубы просто не нужны. Их могут заменить дешевые цементные или даже

гончарные трубы, задача которых лишь защитить лучи света от поглощения в парах воды и от рассеяния частицами пыли, тумана, дождя и снега. Световые волны передаются в таких линиях от зеркала к зеркалу, от линзы к линзе. Трубы не участвуют в процессе передачи. Ведь «открытые стенки» оптической линии передачи не позволяют световым волнам коснуться стенки трубы.

Наибольшие трудности при практическом построении оптических линий связи возникают с необходимостью обеспечения больших точностей. Ведь, говоря языком геометрической оптики, лучи света должны быть очень точно направлены от одного элемента линии к другому, от зеркала к зеркалу, от линзы к линзе. Особенно сложна не первоначальная настройка линии. С этим оптики и инженеры справляются легко. Затруднения возникают в процессе эксплуатации, когда линия уже лежит в земле и труднодоступна обслуживающему персоналу. Здесь на помощь приходит автоматика, исправляющая положение отдельных элементов, нарушенное в случае усадки грунта или в результате других причин.

Выбор между зеркалами и линзами, причем в пользу зеркал, определен в настоящее время чисто практическими соображениями устойчивости оптической линии при неблагоприятных внешних воздействиях. Оказывается, комбинируя зеркала в подобие обычных перископов, можно сделать перископические блоки гораздо менее чувствительными к случайным внешним воздействиям, чем обычные зеркала или линзы.

В ФИАНе

А.М. Прохоров и его давнишний сотрудник А.И. Барчуков со свойственной им острой способностью находить новые возможности в теориях и разработках применили зеркальную линию в своем лазере. Этот лазер, использующий углекислый газ, работает в инфракрасном диапазоне на волне около 10 микрон. Такие лазеры способны генерировать большие мощности, но их длина зачастую превышает 100 метров. Для экономии места их обычно «складывали» из отдельных отрезков, так что резонатор лазера содержал большое количество зеркал. Это ухудшало качество резонатора, сильно затрудняло его юстировку и делало его чувствительным к толчкам и другим внешним воздействиям.

Прохоров и Барчуков решили заменить резонатор оптической линией, образованной специальными зеркалами. Чтобы добиться этого, достаточно убрать крайние зеркала, придававшие прежним конструкциям свойства резонатора. Конечно, лазер терял способность генерировать. Он превращался из оптического квантового генератора в оптический квантовый усилитель.

Но именно этого и добивались Прохоров и Барчуков. Они направили в такой усилитель излучение сравнительно маломощного, но высококачественного лазера того же типа. Его длина составляла всего около трех метров. Он очень надежен и устойчив. Длинный усилитель, воспринявший все преимущества квазиоптической линии перед резонатором, оказался весьма надежным и удобным. Ведь он отличался от обычной зеркальной линии только тем, что между ее зеркалами помещены трубки с углекислым газом, возбуждаемым электрическим разрядом. Благодаря остроумной находке Прохоров и Барчуков сумели «уложить» свой огромный лазер на «этажерке», легко помещающейся в одной из самых маленьких комнат их лаборатории.

Одно из оригинальных применений квазиоптических методов разработала Наталия Александровна Ирисова в лаборатории, руководимой Прохоровым. Она поставила перед собой задачу создания метрики в почти не освоенных диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн.

В этих диапазонах измерительные методы классической радиотехники полностью теряют силу просто из-за того, что размеры волномеров, измерительных линий и других приборов и деталей, необходимых для реализации измерений, становятся чрезмерно малыми.

Столь малыми, что их очень трудно изготовить с необходимой точностью. Но даже если они были бы изготовлены, их применение неэффективно. Требуется слишком точная настройка — юстировка, как вслед за оптиками говорят радиофизики, проникшие в эту пограничную область.

Добротность объемных сверхминиатюрных резонаторов становится недопустимо малой. Одним словом, попытка ограничиться простым изменением размеров при сохранении общих принципов не приводит ни к чему хорошему.

Именно здесь, в диапазоне, лежащем между царством оптиков и государством радистов, естественно развивать квазиоптические методы, создавать специфические аналогии оптических приборов.

Однако то, что уже сделано для диапазона сантиметровых волн, здесь не годилось. Не существовало подходящих прозрачных материалов для изготовления хороших линз. Не из чего было создать полупрозрачные зеркала для интерферометров. Все приходилось начинать сначала. Основным элементом большинства приборов Ирисовой стали сеточки, образованные тончайшими металлическими проволочками. Они столь тонки, что рамки, на которых они натянуты, кажутся пустыми.

Сеточки прозрачны для света потому, что между проволочками толщиной всего в несколько десятков микрон оставлены такие же промежутки. Эти промежутки прозрачны и для радиоволн, с которыми работает Ирисова, прозрачны для тех волн, которые поляризованы поперек проволочек. Стоит повернуть сеточку на четверть оборота, и она будет отражать эти волны так же хорошо, как если бы она была сделана из сплошного металла. В этом случае радиоволна возбуждает в проволочках электрические токи, которые погасят падающую волну и породят идущую обратно отраженную волну.

Если же сеточка повернута так, что проволочки идут в некотором промежуточном направлении, она частично отразит, а частично пропустит падающую на нее волну. Так простая сеточка работает в качестве управляемого делителя мощности.

Взяв две параллельные сеточки, Ирисова создала резонатор, субмиллиметровый аналог оптического интерферометра Фабри — Перо, позволяющий удобно и точно мерить длину падающих на него волн.

Здесь не место описывать все придуманные и осуществленные ею и ее сотрудниками квазиоптические детали. На их основе создан спектроскоп, параметры которого существенно превосходят характеристики всех известных отечественных и зарубежных приборов, построенных на основе традиционных деталей.

Ирисова и ее сотрудники не только творцы этих замечательных приборов, но и первые их потребители. Они уже применяют свои приборы в исследовательских целях и получили много новых интересных данных о свойствах различных веществ в осваиваемом ими диапазоне. Диапазоне, куда они проникают со стороны радиоволн и где они все чаще и чаще встречают лазеры.

Большинство особенностей зеркальных и линзовых линий связи, как, впрочем, и способность открытого резонатора удерживать внутри себя энергию световых волн, можно усмотреть из существования каустических поверхностей. Так называются воображаемые поверхности, отличающиеся тем, что их касаются все лучи, проходящие через пару линз или идущие от одного зеркала к другому. Такие поверхности можно заметить уже в геометрических построениях Гюйгенса и Декарта.

Если все лучи света касаются какой-либо поверхности, значит ни один из них не пересекает ее. Значит, свет не проходит сквозь поверхность, даже если она и является воображаемым геометрическим образом. Это и есть та открытая стенка открытого резонатора или открытой оптической линии, о которой столько раз говорилось выше. Но рассуждения геометрической оптики, верно описывающие ситуацию в общих чертах, не могут объяснить ни причину возникновения каустик, ни реальное распределение электромагнитного поля вблизи каустики. Волновая теория может. Она показывает, как каустики возникают в результате взаимодействия (интерференции) волн, отраженных от

поверхности зеркала или прошедших сквозь линзу, и волн, дифрагировавших на ее границе.

Квазиоптические методы расчета, являющиеся сочетанием волновых и геометрических методов, позволяют проследить за этим во всех подробностях. Почувствовать, как формируется реальная незримая граница открытого резонатора. Граница, вблизи которой интенсивное поле, существующее внутри резонатора, плавно, но очень быстро убывает до нуля. То же самое происходит и вблизи незримых боковых поверхностей, ограничивающих открытые линии передачи.

Квазиоптические методы лишь недавно проявили свою мощь в видимом и инфракрасном диапазоне световых волн. Квазиоптические детали и устройства все шире применяются в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Квазиоптика приобрела широкие права гражданства, и приставка «квази» ни в коей мере неспособна умалить приносимую ею пользу.

Так имя Квазимодо, ставшее среди мещан и снобов символом устрашающего уродства, вызывает в памяти вдумчивого читателя представление о душевном благородстве, о непоколебимом самопожертвовании во имя высокой любви.

Думаю, соединив латинское «квази» с французским «модо», Виктор Гюго хотел сказать, что такие характеры не типичны для его времени.

Заключение. Цепь времен

Цепь! Пожалуй, ни одно изображение не получило столь разнообразных применений. Добрых и злых, служащих насущным потребностям и мимолетным капризам. Впрочем, почти то же самое можно сказать и о веревке, о которой не принято говорить в некоторых домах. Но она же спасла жизнь не одному альпинисту. И нужно самому побывать в горах для того, чтобы понять, как через гибкую веревку смельчак, поднимающийся первым, чувствует поддержку товарища, стоящего внизу.

Века и века человечество жило с оглядкой на античных мудрецов. Их творения верно служили потомкам, поддерживая их постепенное движение по путям прогресса, как кованые цепи удерживают подвесной мост. Но бывали времена, когда античные каноны превращались в злые цепи, сковывавшие мысль людей. И нужны были героические усилия, иногда и жертвы, для того, чтобы порвать эти цепи, отбросить их и через период Возрождения вырваться на простор нового времени. Войти в эпоху, жизнь которой все больше и больше определяется не деяниями одиночек, а творчеством масс. Так постепенно выковываются новые связи, сплачивающие каждого со всеми, дающие опору передовикам, уверенность отставшим, беспредельную мощь человечеству.

Каждый может подтвердить сказанное множеством примеров из своего личного опыта, из рассказов бывалых людей, из уроков истории. В моем воображении связь поколений лучше всего материализуется развитием науки и техники с присущей им сменой бурных взлетов, стремительных скачков и периодов застоя.

Один из выдающихся мудрецов древности, Герон Александрийский, описал много приспособлений, использующих силу пара. И для забавы, и для открывания тяжелых врат храмов. Понадобилось семнадцать веков, чтобы возникли условия, потребовавшие привлечения пара в помощь громоздким водяным и ветряным двигателям. Не удивительно, что именно там, где потребность была особенно острой, — в промышленных районах Урала и Британских островов, — родились первые паровые машины, работавшие автоматически, без участия человека.

Паровая машина вызвала промышленную революцию. Это знает каждый. Она породила и новую область науки — термодинамику. Переход от феодальных отношений и мануфактурного производства к капитализму — несомненное следствие появления паровой машины. За сотню лет мощность паровой машины возросла от пяти лошадиных сил до двадцати тысяч, ее экономичность увеличилась почти в сто раз. Она породила гигантские

паровые турбины, пароструйные насосы и паровые молоты.

Ее потомки не сдают позиций перед электричеством. Они заключили союз с атомом. Ведь пока ни одна атомная электростанция не обходится без паровых турбин. И не так уж важно, что в некоторых из этих турбин работают не пары воды, а пары натрия или других веществ.

Трансмиссия... Я спрашивала многих своих знакомых о значении этого слова. Большинство из них отвечали, что это техническое наименование коробки переключения скоростей автомобиля — коробки передач. Только немногие вспомнили, что в оные годы трансмиссией называлась громоздкая система передачи от двигателя к станкам и машинам. Главной частью трансмиссии был длинный вал, укрепленный под потолком цеха. Широкие кожаные ремни, сшитые в кольцо, соединяли шкивы, укрепленные на трансмиссии со шкивами, вращающими станки. Особенно толстый и широкий ремень соединял таким же образом трансмиссию с паровой машиной, а позже с большим электромотором, обслуживающим целый цех.

Но трансмиссия существовала задолго до начала века пара. Она соединяла нехитрые станки первых мануфактур с водяными двигателями. Сколько увечий и смертей вызваны ее ремнями!

Вторая промышленная революция, совершенная электричеством, привела к изгнанию трансмиссий из цехов. Паровая машина оторвала фабрику от реки. Дешевый и надежный электромотор вытеснил трансмиссию. Ее заменил индивидуальный электропривод.

Но электричество не ограничивалось одной победой! Оно внедрилось в святая святых промышленного производства. Пар давал только механическую силу. Все остальное в существенной мере оставалось старым — резцы, сверла, пилы. Электричество стремится вытеснить и их. Электрическая искра режет, сверлит и полирует. Электрический ток выделяет алюминий и другие металлы из минералов, вырабатывает удобрения и азотную кислоту из воздуха, освещает улицы и дома, охлаждает помещения и продукты.

И вот электричество породило лазер. Яркий луч лазера сразу привлек всеобщее внимание. Не века, как в случае пара, не столетие, пролежавшее между элементом Гальвани и первым электромотором, немногие годы понадобились ученым и инженерам, чтобы приобщить лазер к трудовой жизни, перевести его из лаборатории в цех, на строительную площадку, на телефонную станцию, на корабль, самолет, в космос.

В то время когда я писала свои первые книги о создателях квантовой электроники — «Безумные» идеи» и «Преобразования гиперболоида инженера Гарина», — американские физики состязались в остроумии, давая шуточные толкования слова «мазер».

Вместо исходной фразы «Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation», означающей «усиление микроволн при помощи вынужденного испускания», появились такие, как «More Applied Scientists Eat Regular» («больше ученых-прикладников едят регулярно») или «Military Application Seem Extremely Remote» («военные применения кажутся крайне отдаленными»), и некоторые другие. И вот последняя фраза вдруг грозно изменилась. Вместо слова «Remote» появилось «Real», которое в этом контексте означает «реально».

В некоторых зарубежных странах в ряде периодических изданий, посвященных не науке и технике, а политике и экономике, в 1970 году в различных вариантах появилось сообщение, смысл которого сводился к следующему: «На полигоне штата Невада лазерным лучом сбит самолет».

Атомное ядро вышло из стен лаборатории 16 июля 1945 года и заявило о себе зловещей вспышкой на полигоне в штате Нью-Мексико. Не прошло и месяца, как по воле крайних реакционеров из состава американской правящей верхушки, без всякой военной необходимости, в угоду новой ядерной дипломатии две ядерные бомбы унесли множество жизней в Хиросиме и Нагасаки.

И только с большим трудом, вопреки ожесточенному сопротивлению военно-промышленного комплекса энергия атомного ядра проникла в мирную жизнь страны —

родины атомной бомбы.

Советские ученые должны были затратить много сил, а страна — огромные средства, чтобы ликвидировать атомную монополию и связанный с нею атомный шантаж. Мы не только достигли этой цели, но и первыми высвободили необъятную энергию термоядерного синтеза и, что не менее важно, первыми пустили в ход атомную электростанцию.

Атом пришел от войны к миру. Люди земли должны принять все меры, чтобы лазер не перешел от мирных дел на службу агрессии.

Пожалуй, первой областью применения лазеров была самая гуманная из них — медицина. Некоторые глазные заболевания приводят к отслоению сетчатки. Человек теряет зрение. В долазерную эру приходилось прибегать к сложному хирургическому вмешательству. И вот окулисты с помощью физиков берут на вооружение лазер. Лазер вместо скальпеля. На эту мысль их натолкнуло фокусирующее свойство хрусталика глаза. Ведь хрусталик — это линза, она собирает пучок параллельных лучей в точку. Так на сетчатке образуется изображение внешнего мира. В новом эксперименте нужно было добиться того, чтобы хрусталик фокусировал луч лазера во вполне определенные точки пораженной области сетчатки. И врачи и физики отчетливо понимали, что промах приведет к поражению здоровой части сетчатки. Но риск — благородное дело. Риск умный, оправданный, рассчитанный. Этим расчетом и занялись физики.

После ряда опытов они придумали специальную оптическую систему, направляющую строго по одной прямой луч лазера и свет небольшой вспомогательной лампочки. Она служит для прицеливания. Когда все готово, врач нажимает кнопку и под влиянием нагрева тканей происходит коагуляция — свертывание тканей, скрепляющее сетчатку с задней стенкой глаза. Это отчасти напоминает точечную сварку металлов. Больной не чувствует боли. Прозрачные среды глаза не поглощают света, они не испытывают ни нагрева, ни поражения, ведь сквозь них идет не сфокусированный луч лазера, так что плотность энергии в нем невелика.

За изящными бескровными операциями стоят бесконечные эксперименты на глазах трупов, затем на глазах животных. Лишь после тщательной проверки лазер получил путевку в медицинский кабинет.

Радиоэлектроника уже давно снабдила хирургов бескровным ножом. То был высокочастотный нож, работающий на принципе коагуляции тканей в результате нагрева их токами высокой частоты. Но, к сожалению, такой нож применим не везде. Во многих случаях нагрев тканей за пределами операционного поля совершенно недопустим. И в таких случаях по-прежнему царствовал скальпель.

Излучение лазера может быть сфокусировано в чрезвычайно узкий пучок. Этот неосязаемый инструмент может проникнуть туда, где прикосновение скальпеля считалось оправданным только потому, что в руках врачей не было ничего лучшего.

Есть еще одна область медицины, в которой лазер делает первые, но многообещающие шаги: лечение некоторых кожных болезней, в том числе страшного рака кожи. Не сфокусированный луч мощного лазера в некоторых случаях вызывает распад больных клеток, не нанося повреждения здоровым.

Этим воспользовались и косметологи, успешно удаляющие при помощи лазеров темные родимые пятна и следы татуировки, кажущейся некоторым юношам столь желанной в молодости и вызывающей лишь сожаление и стыд в более зрелые годы.

Лазер позволяет производить и другие операции. Тонкие, сверхювелирные. Это форпосты медицины. В лабораториях генетиков лазер меняет наследственные свойства простейших одноклеточных существ. С его помощью ученые надеются расшифровать наследственный код растений и животных. Вызывать направленные мутации и тем намного сократить длительный и трудоемкий процесс выведения новых сортов растений и пород животных.

Миллионы людей, смотрящих передачи Московского телевидения, не подозревают о том, что полукилометровая стрела башни Останкинского телецентра возведена при помощи

лазера. Красный луч газового лазера, работающего на смеси неона и гелия, с величайшей точностью указывал строителям положение вертикальной оси башни.

Лазеры-строители помогают людям во всех случаях, когда им приходится работать с большой точностью в сложных условиях. Они облегчают труд маркшейдеров, выверяя направление горных выработок, а подчас и управляя движением щитов, прокладывающих туннели. При строительстве каналов они держат заданный уклон, помогают сооружать железные и шоссейные дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов.

Потребность в измерении расстояний возникла перед человечеством в глубокой древности. В Египте, где разливы Нила вызывали необходимость ежегодного восстановления границ земельных участков, обязанности землемеров исполняли жрецы. Да и в других земледельческих странах профессия землемера была одной из наиболее древних и почетных. Такой землемер, вооруженный знанием геометрии и своими нехитрыми приборами, дожил и до наших дней. Лишь сравнительно недавно, несколько сотен лет назад, появились Землемеры с большой буквы — топографы и картографы, полем деятельности которых стали страны и континенты, весь земной шар.

Медленно, очень медленно совершенствовались их инструменты: мерные линейки, нивелир и буссоль. Составление точных карт до сих пор остается дорогим и трудоемким делом.

И здесь наряду с аэрофотосъемкой, применением искусственных спутников Земли, радиодальномеров все чаще применяются лазерные дальномеры, более точные, легкие и простые в обращении. Лазерный луч добрался до Луны и измерил расстояние до нее много точнее, чем это было возможно при помощи лучших телескопов.

Каждый покупающий часы прежде всего интересуется, сколько в них камней. Вряд ли сейчас найдется фирма, рискующая выпустить на рынок наручные или карманные часы без этих камней. Они не найдут покупателя. Камни, а точнее подшипники, и некоторые другие ответственные детали часов, изготовленные из искусственного рубина, обеспечивают часам точность и долговечность.

Поистине ювелирное искусство обработки этих мельчайших деталей превратилось в массовую операцию. Обычно ее осуществляют сложные специальные автоматы. Но некоторые швейцарские фирмы предпочитают отправлять эти рубины в слаборазвитые страны, где ручной труд дешев, и привозят готовые детали обратно в Швейцарию.

Теперь и сложные автоматы, и безвестные жительницы острова Маврикия будут заменены новыми устройствами, в которых главную роль играет лазерный луч. Сфокусированный до толщины человеческого волоса, луч легко пробивает тончайшие отверстия не только в рубине, но и в алмазе, в кристаллах боразона, карбида бора и других искусственных сверхтвердых материалах.

Лазеры применяются и при сверлении фильеров для протяжки проволоки или формирования полимерных нитей. В последнем случае часто бывает необходимо иметь отверстия сложной формы — овалы, треугольные и еще более сложные.

Можете себе представить, как трудно приготовить их при помощи обычного инструмента?

Лазерный луч без труда решает и другую сложнейшую задачу — сверление отверстий, идущих не перпендикулярно, а наклонно к поверхности изделия.

В технике нередко возникают задачи, с полным правом претендующие на титул головоломки. Сварка в вакууме, изготовление предельно точных деталей — инженеры на многие из них готовы были махнуть рукой: таких сложных решений они требовали для осуществления. И вот лазер с легкостью сваривает между собой две проволоочки, заключенные в запаянный стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Работает в автомате, изготавливающим точные малогабаритные сопротивления для радиопромышленности. В таком автомате лазер испаряет угольную пленку, нанесенную на керамику. Лазер незаменим и при производстве микромодулей для радиоэлектроники.

Мощность газовых лазеров, в которых основным рабочим веществом является

углекислый газ, может достигать десятка киловатт. Этого достаточно для того, чтобы плавить в вакууме тугоплавкие металлы, выплавлять сверхчистые металлы из руд, обрабатывать керамику и выполнять множество других операций, требующих предельных концентраций энергии.

Лазер делает лишь первые шаги в промышленности и строительстве. Ученые уверены, что перед лазером огромное будущее в управлении химическими реакциями, в создании новых высокоэффективных технологических процессов.

Я смогла здесь коротко рассказать лишь о некоторых новых специальностях лазеров. Их, конечно, много больше, и с каждым днем число увеличивается.

Мне хотелось привести лишь примеры, демонстрирующие гибкость и многогранные возможности лазерной техники. Не сомневаюсь, что каждый из моих читателей найдет многочисленные задачи, решение которых при помощи лазеров было бы проще и эффективнее, чем существующие.