

## Школа чл.-кор. РАН С.Г.Раутиана по физике лазеров в Институте автоматики и электрометрии СО РАН

А. М. ШАЛАГИН, Д. А. ШАПИРО

Первый лазер был создан в 1961 г., примерно в те же годы появилась и физика лазеров. Различные вещества изучались с новой точки зрения: пригодны ли они в качестве активной среды оптических квантовых генераторов и усилителей. Научные статьи того времени были посвящены получению генерации в новых средах. Параллельно исследовались возбужденные состояния в спектрах атомов и молекул, выяснялись механизмы их заселения, измерялись вероятности переходов. В 1965 г. С.Г.Раутиан приехал в Новосибирск и вокруг него начала формироваться школа сибирских физиков-лазерщиков. В Новосибирском университете появилась тогда новая специальность «Квантовая оптика».

Прошло более 40 лет. Лазеры из лаборатории пришли в повседневную жизнь. Дома они представлены в виде лазерных CD и DVD проигрывателей в музыкальных центрах, на работе - в лазерных принтерах, в магазине - в виде лазерного считывателя штрих-кодов. Лазерные шоу в столицах весь мир видит в теле-новостях. В лабораториях сейчас лазеры охлаждают газ до миллиардных долей градуса, усиливают излучение до триллиона ватт или генерируют импульсы длительностью несколько сотен аттосекунд ( $1 \text{ аттосекунда} = 10^{-18} \text{ сек}$ ). Физика лазеров научилась учитывать многочисленные релаксационные процессы и рассчитывать заранее, какие лазерные среды пригодны для того или иного научного или практического приложения.

Школа С.Г.Раутиана окончательно оформилась после создания его лаборатории физики лазеров в 1977 г. в Институте автоматики и электрометрии СО РАН. Одновременно была создана кафедра «Квантовая оптика» в Новосибирском государственном университете. Под руководством С.Г.Раутиана кафедра выпустила более 400 квалифицированных специалистов по физике лазеров. Сейчас коллектив школы в основном состоит из выпускников кафедры.

С. Г. Раутиан подготовил лично более 30 кандидатов наук, 14 его учеников стали докторами наук, а один - членом-корреспондентом РАН. «Выпускники» школы работают в различных лабораториях страны и мира. Часть школы, состоящая из студентов и научных сотрудников ИАиЭ СО РАН, ведет исследования по нели-



С. Г. Раутиан

нейной оптике и спектроскопии, изучает плазму, наноконпозиты, оптоволоконные лазеры. К важнейшим результатам школы можно отнести новые результаты в исследовании плазмы ионных сильноточных лазеров, поляризационные эффекты нелинейной спектроскопии, эффект сверхизлучения Дикке в комбинационном рассеянии света, получение новой информации о столкновениях атомов и молекул методами нелинейной спектроскопии, открытие ряда светоиндуцированных газокинетических явлений, в частности эффекта светоиндуцированного дрейфа (СИД), выяснение роли собственного излучения разряда на кинетические процессы в нем, распространение ультракоротких световых импульсов в световодах, доказательство важной роли кулоновского рассеяния ионов в нелинейной спектроскопии плазмы.

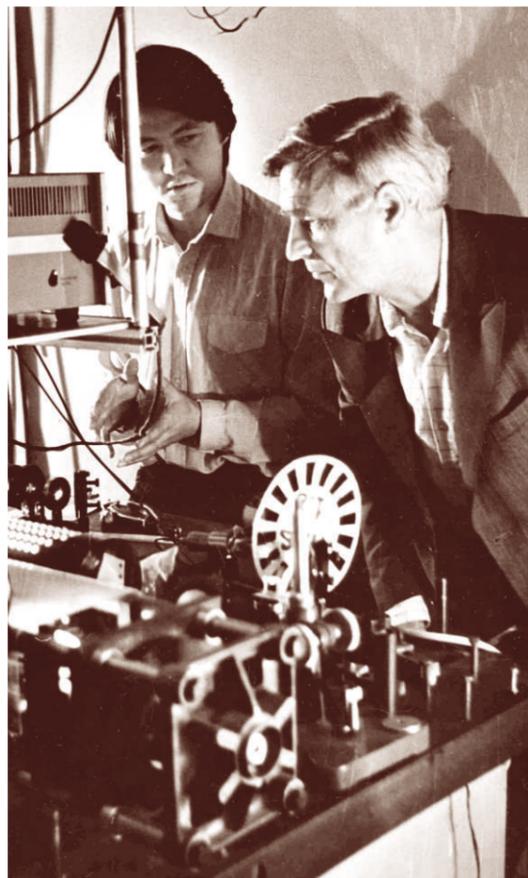
Школа состоит из учеников С.Г.Раутиана и их учеников. Сначала мы расскажем о некоторых научных достижениях самого С.Г.Раутиана и приведем два примера результатов его учеников. Среди недавних работ учеников можно выделить две, которые, по данным ISI Web of Science, уже собрали около 40 цитирований каждая. Это экспериментальные работы В.П.Сафонова и др. «Спектральная зависи-

мость селективной фотомодификации во фрактальных агрегатах коллоидальных частиц», выполненная совместно с американскими учеными и опубликованная в журнале «Physical Review Letters» т.80, №5 (1998), и работа С.А.Бабина и др. «Непрерывное резонансное четырехволновое смешение в двойной лямбда-схеме уровней димеров натрия», выполненная совместно с немецкими учеными и опубликованная в журнале «Optics Letters» т.21, №15 (1996). В заключение мы перечислим свидетельства мирового признания результатов школы и выделим ее основные традиции.

### Может ли спектроскопия быть нелинейной?

С.Г.Раутиан предложил и обосновал метод кинетических уравнений для так называемой «матрицы плотности», который в настоящее время стал основным в нелинейной спектроскопии газовых сред. С помощью метода матрицы плотности все основные эффекты нелинейной спектроскопии были сведены к трем: насыщению, полевому расщеплению и нелинейной интерференции квантовых состояний. Эти результаты легли в основу внутридоплеровской спектроскопии. Спектроскопия появилась в XIX в. вместе с термином «спектральная линия». Такое название казалось правильным, потому что линия не имеет ширины. Но опыты Фраунгофера позволили увеличить разрешающую способность спектральных приборов и выяснить, что у «линии» имеется «профиль» - распределение интенсивности излучения или поглощения по частоте. Профиль спектра поглощения газа назвали доплеровским, потому что линии становятся более широкими из-за теплового движения молекул и связанного с ним эффекта Допплера. Внутридоплеровская спектроскопия - это измерение профиля спектральной линии с более высоким разрешением, чем доплеровская ширина спектральной линии.

Во второй половине XX в. лазеры позволили увеличить спектральное разрешение на несколько порядков величины, а электроника повысила точность, поэтому внутри доплеровского профиля спектральной линии исследователи смогли регистрировать весьма сложные структуры. В школьной программе изучается закон Бугера: поглощение в среде прямо пропорционально интенсивности падающего излучения. В мощных лазерных полях пропорциональность уже не соблюдается, поэтому данные эффекты называют нелинейными. Чтобы разобраться, в экспериментах, стали применять два лазера: один, мощный, воз-



Геннадий Родионов и С. Г. Раутиан.

буждает состояния атомов или молекул с высокой энергией, а второй, малой мощности, зондирует среду. Такая схема называется методом пробного поля. Форма и ширина структур меняются также в зависимости от давления, химического состава газа, угла между лазерными пучками. Если давление газа низкое, можно пренебречь столкновениями молекул. В таком идеализированном случае все профили структур удалось объяснить тремя квантово-механическими эффектами. Эффект *насыщения* - самый «старый» из них, его предсказали еще на заре квантовой механики. Если мощное излучение резонансно переходит атома или молекулы, то можно пренебречь спонтанным излучением, а поглощение и вынужденное излучение имеет одинаковые вероятности (коэффициенты Эйнштейна). Поэтому количество частиц в верхнем и нижнем состояниях становится примерно одинаковым и коэффициент поглощения стремится к нулю. Второй эффект - *полевое расщепление*. Лазер обладает высокой степенью монохроматичности. Во многих задачах можно считать, что все его излучение выходит строго на одной частоте. Пусть частота излучения близка к частоте перехода в атоме. Атом попадает в периодическое поле, в результате

спектральные структуры в спектре пробного поля расщепляются. При точном резонансе расстояние между спектральными компонентами называют частотой Раби. Частота Раби прямо пропорциональна электрическому полю световой волны и дипольному моменту перехода, поэтому характеризует интенсивность взаимодействия атома со светом. Это взаимодействие и приводит к расщеплению уровней. Третий базисный эффект - *интерференционный*. Лазерное излучение смешивает верхнее и нижнее состояния атома. В квантовой механике это называется «когерентной суперпозицией» состояний. Такая суперпозиция проявляется в спектре пробного поля в виде знакопеременной структуры. При изменении частоты зондирующего лазера поглощение сменяется усилением. В настоящее время нелинейные интерференционные эффекты открыты не только в схеме пробного поля, но и в фотоионизации, уширении спектральных линий в плазме и других областях атомной физики.

Если теперь вернуться от идеального случая к реальному газу, то надо учитывать столкновения. Они бывают разных типов и по-разному влияют на спектральные структуры. С.Г. Раутиан, а впоследствии и его ученики внесли значительный вклад в спектроскопию столкновений: изменяющих скорость, внутреннее состояние атома, дипольный момент. Книги С.Г.Раутиана и соавторов «Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул» и «Kinetic Problems of Non-Linear Spectroscopy» давно стали настольными для ученых во многих лабораториях России и мира.

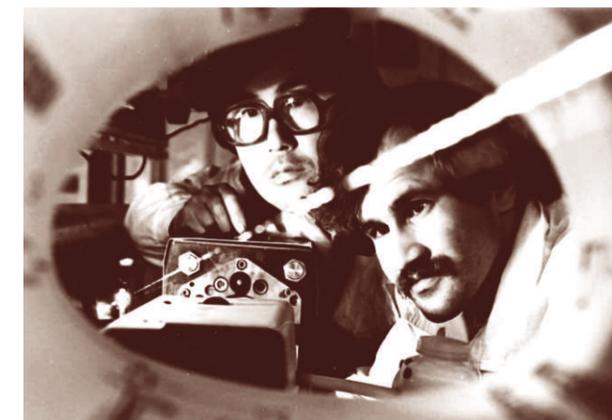
### Можно ли собрать свет в точку?

Каждый, кто знаком со школьным курсом оптики, знает, что это невозможно - дифракция не позволяет локализовать волну, в частности электромагнитную, в области, много меньшей в сравнении с длиной волны. Дифракционный предел ограничивает пространственное разрешение микроскопов и телескопов, ставит барьеры на пути повышения плотности оптической записи и считывания информации, препятствует уменьшению размеров структур, получаемой фотолитографией, - как правило, дифракция является фундаментальным ограничением «тонкости», с которой мы можем диагностировать либо видоизменять среду посредством света.

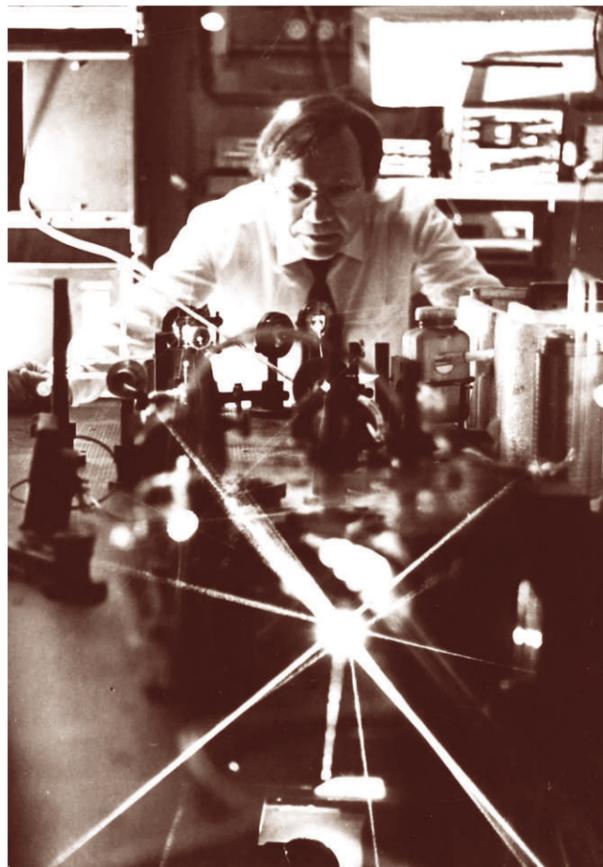
Вместе с тем, хорошо известно, что энергия электрического поля может быть сосредоточена в очень малой области пространства. В частности, переменное поле может быть локализовано на размерах, много меньше

соответствующей длины волны. Так, электромагнитное поле концентрируется рядом с металлическим острием. Поля вблизи источников или рассеивателей электромагнитного излучения не описываются бегущими волнами, и, соответственно, «дифракционный предел» в этом случае отсутствует.

Локализация оптического возбуждения в металл-диэлектрических неупорядоченных наноструктурах - еще один пример концентрации световой энергии на масштабах меньше длины волны, обнаруженный сравнительно недавно. В работах В.П.Сафонова с соавторами показано, что облучение фрактальных кластеров серебра и золота (в виде пленок и коллоидных растворов) с энергией светового импульса выше некоторого порога приводит к появлению необратимых изменений в структуре наноагрегата. Фотомодификация (такое название получил данный эффект) может затрагивать весьма небольшие области агрегата вплоть до отдельных наночастиц и может приводить к значительному изменению размеров некоторых частиц, объединению соседних частиц в одну, либо к «исчезновению» частицы. При этом в спектре поглощения наноагрегата наблюдаются «провалы» на частотах, соответствующих длине волны лазерного излучения. В работе были исследованы спектральные характеристики фотомодификации наноагрегатов металлов, в частности, ширины провалов. Продемонстрирована возможность одновременной (т. е. на одном нанокompозитном образце) записи до пяти различных спектральных провалов. Предполагается, что частотная селективность фотомодификации может найти применение для уплотнения записи информации.



С. И. Атутов и В. А. Сорокин.



А. М. Шалагин

**Можно ли изменить цвет лазерного излучения?**

Иногда для приложений в науке и технике требуется мощное когерентное излучение не на той длине волны, на которой его излучает лазер. Чтобы изменить длину волны (или частоту) излучения, придумываются нелинейно-оптические методы преобразования частоты. Среди этих методов особое место занимает четырехволновое смешение. В нелинейной среде смешивается свет трех частот и генерируется излучение на новой частоте. Частота четвертой волны в зависимости от схемы равна сумме частот, сумме третьей частоты и разности первой и второй и т. п., например, при смешении зеленого, желтого и красного лучей генерируется синий. Комбинируя разные схемы и разные лазеры накачки, можно получить свет практически любой частоты.

Раньше все опыты по такому смешению ставились далеко от резонанса частоты волны с атомами или молекулами среды, потому что в резонансе свет сильно поглощается. В работе Бабина и соавторов впервые удалось осуществить полностью резонансное четырехволновое смешение. В качестве среды были выбраны

атомы натрия, которые в специальной высокотемпературной ячейке соединялись в молекулы  $Na_2$  - димеры. Идея состояла в том, что можно ослабить поглощение за счет эффекта полевого расщепления. При этом в резонансных условиях сильно увеличились нелинейные восприимчивости молекул, и поэтому коэффициент преобразования мощности лазеров получился рекордно высоким.

Мощность четвертой волны в эксперименте почему-то насыщалась, т.е. переставала линейно увеличиваться, с ростом мощности одного из лазеров накачки. Оказалось, что причина такого поведения - не эффект насыщения, как некоторые думали вначале, а все то же полевое расщепление под действием мощного излучения лазеров накачки. Более того, был предложен и реализован метод компенсации расщеплений с помощью синхронного изменения мощности двух лазеров накачки. Теперь мощность четвертой волны ограничена практически только мощностью лазеров.

**Признание**

Ежегодно в мире проводятся десятки конференций по проблемам, связанным с лазерами, выходят сотни выпусков специальных журналов. Но и на фоне такого мощного потока информации данная школа выделяется фундаментальностью подхода к решению теоретических задач, новыми идеями в эксперименте, тесным взаимодействием теоретиков и экспериментаторов.

Исследования С.Г. Раутиана в 1986 г. удостоены премии РАН имени академика Д.С. Рождественского. Школа в сегодняшнем ее составе участвует в программе «Фундаментальная спектроскопия» Миннауки России, программах Сибирского отделения РАН, осуществляет ряд проектов, которые поддержаны РФФИ, INTAS (ЕС), CRDF (США), ГФЕН (КНР). Коллектив школы С.Г. Раутиана состоит из нескольких поколений ученых, так, например, прямые ученики С.Г. Раутиана - В.П. Сафонов, Э.Г.Сапрыкин, С.А. Бабин, Д.А. Шапиро сами уже подготовили по два-четыре кандидата наук, а те, в свою очередь, руководят дипломными работами студентов и магистерскими диссертациями.

Работы школы стимулировали исследования в лабораториях США, Канады, Австрии, Нидерландов, Польши, Италии, Германии, Англии и других стран. Во-первых, некоторые ученики С.Г.Раутиана возглавили лаборатории за рубежом и на современном оборудовании развивают начатые в Новосибирске исследования. Примером может служить Университет

Пурдю (США), где исследуются металлические наноконпозиты агрегаты из металлических частиц размером в нанометр ( $10^{-9}$  м). Во-вторых, зарубежные ученые часто продолжают исследования школы, прочитав статьи, даже без личного знакомства с их авторами. Пример - исследования по спектроскопии молекулярных столкновений в газах в лаборатории атмосферной физики Университета Торонто (Канада).

**Традиции**

Среди традиций, присущих школе С.Г.Раутиана, можно выделить пять, а именно:

1. Теснейшее **сотрудничество экспериментаторов и теоретиков**. Многие проблемы ставились перед экспериментаторами теоретиками из общих теоретических соображений. Но не менее редко полученные экспериментаторами результаты заставляли интенсивно работать теоретиков.

2. Доводка результатов исследований до **предельно возможного уровня ясности**. Иногда на качественное объяснение нового эффекта уходит много дополнительного времени и сил. Однако это время ни в какой степени нельзя считать потерянным. Хорошее объяснение “на пальцах” позволяет рассказать о новом эффекте студентам, выбрать правильное стратегическое направление дальнейшей работы.

3. **Семинар** (<http://iae.nsk.su/~yura/seminar/2003.htm>), куда приглашаются не только именитые ученые, но и все, кто интересуется фундаментальной наукой: студенты, аспиранты, исследователи других специальностей. На семинаре

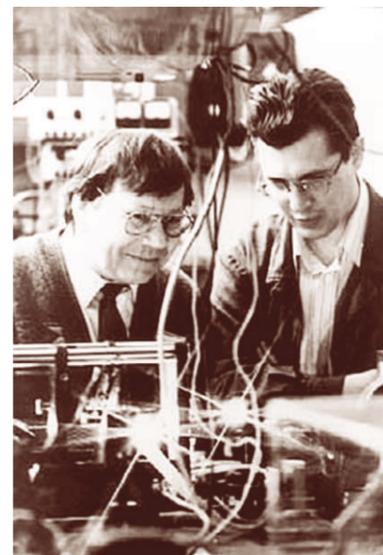


Д. А. Шапиро и С. Г. Раутиан.

докладчику задаются вопросы и высказываются замечания, причем, высказываются по существу, независимо от ранга докладчика и его оппонента. По традиции, заложенной еще в 60-е г., семинар имеет и информационную, и образовательную функции, что исключительно важно для профессионального роста и расширения кругозора ученых, особенно молодых.

4. **Совмещение научной и преподавательской деятельности**. Люди, непосредственно получающие новые научные результаты, лучше донесут до студентов передовые методы работы. Опыт показывает, что есть и обратное влияние: ответы на многочисленные вопросы студентов стимулируют самого ученого.

5. **Забота о научной молодежи**. Научные руководители требуют, чтобы молодые ученые много работали, повышали свой уровень образования. В то же время руководители помогают студентам и аспирантам составлять заявки на молодежные конкурсы, гранты различных фондов, доклады на конференции, пишут рекомендательные письма в зарубежные организации.



А. М. Шалагин и О. А. Востриков около установки для исследования светоиндуцированного дрейфа.



С. Н. Амутов, почетный доктор СО РАН М. Дюклуа, Э. Г. Сапрыкин.