

## РАЗВИТИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ИАиЭ

А. М. ШАЛАГИН



С приходом в Институт Сергея Глебовича Раутиана в 1977 г. в Институте сформировалась активная команда физиков-лазерщиков и начались систематические исследования в области физики лазеров, нелинейной оптики и нелинейной спектроскопии. Основу команды составили специалисты, работавшие с С.Г. Раутианом еще в прежние годы, в первый приезд его в Новосибирск (С.Н. Атутов, А.П. Кольченко, Э.Г. Сапрыкин, Г.И. Смирнов, В.П. Сафонов, А.М. Шалагин). Несколько позже сюда добавились группы К.Г. Фолина и В.И. Дониная, в полном составе перешедшие в ИАиЭ из других институтов СО РАН. Уже через год-два появились молодые выпускники кафедры «Квантовая оптика» НГУ - С.Н. Селезнев, Д.А. Шапиро, В.А. Сорокин, Г. Д. Родионов. Далее пошло регулярное пополнение выпускниками этой кафедры. Длительное время весь этот коллектив был объединен в одну лабораторию - лабораторию физики лазеров под номером 1-8.

С самого начала был принят принцип проводить исследования широким фронтом: изучение нелинейного взаимодействия лазерного излучения с различными средами, исследование физических процессов, протекающих в лазерах разного типа, и на этой основе создание лазеров с улучшенными характеристиками. Особое внимание уделялось нелинейной спектроскопии газов - главному увлечению С.Г.Раутиана в предыдущие годы. Мой рассказ посвящен именно этому направлению, поскольку в основном здесь были сосредоточены мои интересы.

В относительно короткое время усилиями Э.Г Сапрыкина, С.Н. Атутова, В.А. Сорокина, Г.Д. Родионова была создана необходимая экспериментальная база и появилась возможность экспериментально проверить и развить те теоретические наработки, которые уже имелись в данном направлении. Начались систематические исследования нелинейных спектроскопических явлений и влияния на них разного рода воздействий (магнитных полей, разного рода столкновений, поляризационных условий и др.). В частности, получила развитие поляризационная и магнито-оптическая нелинейная спектроскопия, развит метод разностных нелинейных резонансов, позволивший выделять резонансы, ответственные за те или

иные релаксационные процессы.

Довольно скоро работы Института по данной тематике были высоко оценены научной общественностью. На регулярно проводимые Вавиловские конференции, в организации которых участвовал и наш Институт, съезжались ведущие ученые мира в области лазерной науки. Среди них были и те, кто впоследствии стал нобелевским лауреатом. От них часто можно было услышать лестные отзывы о работах С.Г. Раутиана и его многочисленных сотрудников. Именно за работы по нелинейной спектроскопии С.Г. Раутиан в 1986 г. получил академическую премию им. Д. С. Рождественского.

В теоретических исследованиях по нелинейной спектроскопии много внимания нами уделялось влиянию столкновений частиц газа на взаимодействие с излучением и на нелинейные спектры. Это влияние оказалось многогранным: столкновения способны разрушать когерентность квантовых состояний, переориентировать частицы, перераспределять их по энергетическим уровням, изменять скорость частиц. Каждый из этих типов столкновений специфическим образом проявляется в нелинейных спектрах поглощения и усиления, спонтанного испускания и комбинационного рассеяния. Изучение этого влияния позволяет понять законы взаимодействия сталкивающихся частиц, улучшить характеристики лазеров, изменить условия преобразования излучения в газовых средах. Наиболее впечатляющим оказался тот факт, что под влиянием столкновений сама среда, находящаяся в поле излучения, приобретает новые, неожиданные свойства.

В процессе развития нелинейной оптики и нелинейной спектроскопии установлено, что взаимодействие интенсивного лазерного излучения с частицами вещества приводит к существенному изменению их внутреннего состояния: происходит существенное перераспределение заселенностей между энергетическими уровнями, возникают когерентные связи между ними, да и сама система энергетических уровней претерпевает значительные изменения (сдвиги и расщепления). Оптические характеристики среды меняются так сильно, что проходящее через нее излучение может изменяться до неузнаваемости: возникает излучение в новых спектральных областях, изменяются режимы распространения излучения, в частности, и его траектория.

Традиционно задача нелинейной оптики и нелинейной спектроскопии состояла в нахождении оптических и спектроскопических характеристик среды, т. е. таких характеристик, которые непосредственно сказываются на характеристиках взаимодействующего со средой излучения и на их изменениях при прохождении излучения через среду. Другим, не оптическим, свойствам среды уделялось несоизмеримо меньшее внимание. Бытовало даже мнение, что в поле излучения физические процессы будут протекать по тому же сценарию, что и обычно, а излучение может влиять лишь на скорость их протекания. В конце 70-х гг. в лаборатории физики лазеров ИАиЭ СО АН СССР установлено, что столь упрощенный взгляд не верен и что в поле интенсивного лазерного излучения макроскопические характеристики среды могут подвергаться такой модификации, что возникают физические явления, которым нет места в отсутствие излучения.

В связи с тем, что в лаборатории физики лазеров развивались исследования в области нелинейной спектроскопии газов, новые физические явления стали исследоваться именно в газовых средах. В итоге сформировалось новое физическое направление - светоиндуцированная газовая кинетика. Началом для этого направления послужило открытие эффекта светоиндуцированного дрейфа (СИД) газов, который оказался самым ярким из класса новых явлений. Физическая сущность эффекта СИД состоит в возникновении относительного

движения (дрейфа) двух газовых компонентов при квазирезонансном оптическом возбуждении одного из них. Дрейф возникает благодаря анизотропии длины свободного пробега частицы, взаимодействующей с излучением, в среде буферных частиц газа: длина свободного пробега в направлении распространения излучения становится больше (меньше) длины свободного пробега в обратном направлении. Эта анизотропия достигается, в свою очередь, благодаря селективному по скоростям лазерному возбуждению (вследствие эффекта Доплера) и изменению «размера» частицы при ее возбуждении. Например, в бегущей световой волне можно селективно возбудить из основного состояния частицы, летящие в направлении распространения излучения. Примем (это наиболее распространенная ситуация), что «размер» частицы при возбуждении увеличивается, а это влечет за собой уменьшение длины свободного пробега по сравнению с невозбужденной частицей. Когда частица полетит в обратном направлении (после одного или нескольких столкновений), она преимущественно будет находиться снова в основном состоянии (за счет спонтанного распада или других деэксцитирующих процессов) с присущей ему большей длиной свободного пробега. Далее цикл многократно повторяется, так что в среднем частица дрейфует в направлении, противоположном направлению распространения излучения. Перестройкой частоты лазерного излучения можно возбуждать части-

цы, летящие навстречу излучению, и тогда они будут дрейфовать в направлении распространения излучения. Это один из вариантов наглядного пояснения существа эффекта СИД. При этом пояснении пренебрегается эффектом передачи импульса со стороны излучения частицам газа. Закон сохранения импульса проявляется в том, что частицы буферного газа движутся в направлении, обратном направлению дрейфа поглощающих частиц, так что светоиндуцированный дрейф происходит без изменения полного давления газа.

Принципиально важным, согласно общефизическим представлениям, является то, что по своей природе эффект СИД не приводит к изменению поступательной энергии газовой среды. Если релаксация возбужденного состояния сугубо радиационная, что реализуется, например, для электронных переходов атомов, то направленное падающее излучение «перерабатывается» в изотропно рассеянное практически без изменения энергии. Таким образом, в газе происходит пространственное разделение компонентов с уменьшением энтропии газа, но без работы внешних сил. Это есть реализация так называемого «демона Максвелла». Нарушения Второго начала термодинамики, конечно же, не происходит: уменьшение энтропии газа заведомо компенсируется увеличением энтропии излучения.

В дальнейших исследованиях выяснилось, что помимо эффекта СИД существует целый класс новых светоиндуцированных газокINETических явлений, для которых характерно «несиловое» воздействие излучения на газовую среду. Специфика этих явлений состоит в селективном воздействии излучения в отношении разного рода физических характеристик (скорости, координаты, углы ориентации и др.) частиц газа при условии различия скоростей релаксации этих характеристик в разных квантовых состояниях поглощающих частиц. В частности, оказалось, что в поле излучения давление в газовой среде перестает быть изотропным, при равновесных стартовых условиях в газе возникают перенос импульса, энергии (тепловые потоки), макроскопическая ориентация и поляризация частиц, в определенных условиях генерируется электрический ток и др. Оказалось также, что к этому классу явлений относится и эффект втягивания (выталкивания) поглощающих частиц в область повышенной интенсивности излучения, который берет начало из работы С.Г.Раутиана и А.М.Шалагина (1972 г.), а в дальнейшем детально исследован теоретически и экспериментально. Селективное по скоростям и координатам воздействие излучения на газ



Вклад теоретиков лаборатории в решение демографических проблем. На снимке А.И. Пархоменко с дочерьми.

приводит к эффекту так называемого светоиндуцированного вязкого течения, создающего перепад давления в канале, через который проходит излучение. Большинство из перечисленных эффектов надежно зарегистрированы и исследованы экспериментально.

Для целенаправленного исследования светоиндуцированных газокINETических явлений в 1979 г. была сформирована специальная научная группа, которая со временем (1989 г.) преобразовалась в лабораторию нелинейной спектроскопии газов. Наибольшее внимание в исследованиях было уделено явлению СИД как самому яркому из совокупности светоиндуцированных газокINETических явлений. Первое его наблюдение было осуществлено в ИАиЭ в 1979 г. в течение месяца после теоретического предсказания. В дальнейшем проводились как теоретические, так и экспериментальные исследования СИД в многочисленных его модификациях, в различных физических условиях и для разных объектов (атомы, молекулы, ионы, электроны и экситоны в твердых телах). Максимальная скорость дрейфа зарегистрирована нами в экспериментах с парами натрия и составила 50 м/с. Показано, что атомарные газы с помощью СИД можно сконцентрировать в области с характерным размером меньше 1 мм, на основе чего можно существенно повысить эффективность лазерных методов регистрации атомарных микропримесей. На основе эффекта СИД осуществлено разделение химических компонентов газовых смесей, изотопов в атомарном и молекулярном виде, ядерных спиновых модификаций молекул. С помощью СИД и эффекта втягивания (выталкивания) впервые надежно стали измеряться транспортные ха-



П. Л. Чаповский и А. Е. Бакарев.



Стоят: А. М. Шалагин, С. П. Подъячев, П. Л. Чаповский, С. Г. Раутиан, А. Е. Бакарев, Сидит: Т. В. Маракулина.

рактеристики возбужденных атомов и молекул. Более того, так называемый аномальный СИД позволил изучать очень тонкие детали потенциала взаимодействия сталкивающихся частиц.

Особое место занимает проявление эффекта СИД в астрофизических объектах. Нами показано, что он должен играть важную роль в формировании аномалий химического и изотопного состава атмосфер так называемых химически пекулярных звезд, участвовать в генерации магнитного поля звезд, в том числе и Солнца. Не исключено, что эффект СИД способствовал сепарации водяных паров и созданию аномалии в относительном содержании водорода и дейтерия в протопланетном диске на этапе формирования планет Солнечной системы.

Исследования светоиндуцированных газокинетических явлений, начатые в ИАиЭ СО РАН (СО РАН), подхвачены во многих научных коллективах в нашей стране и за рубежом (Нидерланды, Италия, Польша, Чехия, США). При этом с большинством из научных групп мы поддерживали тесное научное взаимодействие и проводили совместные исследования. Наиболее продуктивной оказалась совместная деятельность с лабораторией Гюйгенса Лейденского университета (Нидерланды), где оказался прекрасный задел по современному оборудованию, накопленному экспериментальному опыту и квалификации исследователей.

К настоящему времени существует более 500 научных публикаций, посвященных светоиндуцированным газокинетическим явлениям. Эти явления отмечены двумя статьями в Физической энциклопедии, отражены в ряде учебных пособий и монографий. По результатам исследований только в ИАиЭ защищено 5 докторских и 7 кандидатских диссертаций. В Лейденском университете на эту тему защищено более 10 диссертаций.



Ф. Х. Гельмуханов в Швеции.

Сотрудники лаборатории нелинейной спектроскопии газов внесли определяющий вклад в развитие данного направления. Так - профессор Ф. Х. Гельмуханов, соавтор предсказания эффекта СИД, активно участвовал в развитии теории СИД, предсказал и исследовал ряд его специфических проявлений и некоторые новые эффекты (ориентация частиц дрейфом, генерация звуковых волн и др.). К.ф.-м.н., С.Н.Атутов осуществил первое наблюдение СИД, сумел обнаружить и ликвидировать обстоятельства, долгое время не позволявшие надежно регистрировать эффект, получил множество пионерских результатов в экспериментальном исследовании СИД атомов, светоиндуцированного тока и эффекта втягивания (выталкивания), впервые применил СИД для стабилизации частоты широкополосного лазерного излучения, первым обратил внимание на возможность проявления СИД в астрофизических объектах. Д.ф.-м.н. П. Л. Чаповский впервые зарегистрировал эффект СИД молекул и провел серию детальных исследований СИД разных молекул. Им впервые осуществлено разделение изотопов (именно в молекулярном варианте) с помощью СИД и разделение ядерных спиновых модификаций молекул. Совместно с сотрудниками Лейденского университета он провел детальные исследования транспортных характеристик возбужденных молекул и механизма конверсии ядерных спиновых модификаций молекул. В обоих случаях получены очень богатые физические результаты. На этой базе под его научным руководством защищено несколько диссертаций в Лейденском университете. К.ф.-м.н. С.П.Подъячев обеспечил проведение экспериментов на современном уровне компьютеризации, детально исследовал эффект светоиндуцированного втягивания (выталкивания) и на его основе получил наиболее точные данные о транспортных характеристиках возбужденных атомов натрия. На оборудовании Лейденского университета он первый обнаружил аномальный эффект СИД и связал его причины с зависимостью транспортной частоты от скорости. К.ф.-м.н. И.М.Ермолаев - соавтор предсказания эффекта светоиндуцированного тока в изначально нейтральном атомарном газе. Совместно с С.Н.Атутовым он экспериментально обнаружил этот эффект в парах натрия и детально его исследовал. В совместных исследованиях с ОИЯИ (Дубна) и с ИЯФ АН Чехии он осуществил разделение радиоактивных изотопов натрия, накопление их и оптическое ориентирование. Ряд важных экспериментальных результатов по исследованию СИД паров лития и эффекта светоиндуци-

рованного тока в плазме получены к.ф.-м.н. П.В.Колинко и к.ф.-м.н. О.А.Востриковым. Д.ф.-м.н. К.А.Насыров осуществил теоретические расчеты, подтвердившие важность эффекта СИД в формировании аномалий в атмосферах пекулярных звезд, внес весомый вклад в теоретические и экспериментальные исследования светоиндуцированного тока в плазме. Успех в развитии теории СИД и других светоиндуцированных газокинетических явлений во многом обеспечивался участием д.ф.-м.н. Л.В.Ильичева и д.ф.-м.н. А.И.Пархоменко. Руководитель лаборатории А.М.Шалагин отмечен академической наградой - Золотой медалью им. П.Н.Лебедева за работы по светоиндуцированной газовой кинетике.

В последние годы в лаборатории продолжают исследования по нелинейной спектроскопии газов. Акцент перенесен на особые, экстремальные условия. Речь идет о спектроскопии ультрахолодных атомов, получаемых в магнитооптических ловушках (в связи с этим П.Л. Чаповским изготовлена такая ловушка и осуществлено эффективное охлаждение паров рубидия, а сейчас планируется получить Бозе-конденсат), о нелинейных процессах при очень высоких давлениях и вдали от резонансных условий, о нелинейных спектрах в условиях сохранения когерентности атомных состояний, о квантовых корреляциях в радиационных процессах отдельных атомов. Как оказалось, здесь выявляются неожиданные эффекты. Так, в частности, выяснилось, что равенство вероятностей поглощения и вынужденного испускания, которое установлено еще Эйнштейном и к которому все привыкли, нарушается для монохроматического излучения в крыле линии поглощения при частых столкновениях. Связано это с тем, что в данных условиях радиационные переходы осуществляются не во время свободного пробега частицы, а в акте столкновения. Как следствие, возможно получение инверсии заселенностей на переходе, где поглощается излучение и, вслед за этим, генерации в новой спектральной области. Второй пример - эффект, обусловленный сохранением атомной когерентности при столкновениях: в некоторых квантовых системах сечение поглощения излучения в нерезонансных условиях в десятки раз может превышать резонансное значение. Это тоже неожиданный результат, поскольку все привыкли к тому, что сечение радиационных процессов максимально именно в резонансных условиях.

Можно с уверенностью утверждать, что исследования в области нелинейной спектроскопии еще далеки до завершения и впереди много нового, неожиданного и интересного.



П. Л. Чаповский



Л. В. Ильичев



К. А. Насыров



А. И. Пархоменко



С. П. Подъячев