

КУЛОНОВСКОЕ УШИРЕНИЕ

Д. А. ШАПИРО



Историю открытия и исследования кулоновского уширения в ИАиЭ СО РАН можно условно разбить на три этапа: исследование провала Лэмба в аргоновом лазере (1979-1988), исследование уширения в трехуровневой системе и комбинационный ионный лазер (1990-1997) и изучение эффектов сильного поля (1998-2004). В кратких воспоминаниях мне хотелось бы показать, что в жизни простые схемы не работают. Обычно журналисты пишут, что теория что-то предсказала, а в эксперименте проверили. Другая схема: в эксперименте измерили, а теоретики объяснили. На самом деле теория и эксперимент непрерывно развиваются параллельно, озадачивая и обогащая друг друга.

Аргоновый лазер и интеграл столкновений Ландау

В физике лазеров, как в Олимпийских играх, есть много разных рекордов. Одни лазеры имеют самую большую энергию одиночного импульса, но к каждому импульсу готовятся сутки. Другие имеют высокую частоту повторения, но маленькую энергию в каждом импульсе. Третьи непрерывные, не такие мощные, но самые стабильные. Среди лазеров видимого диапазона частот в 1970-х гг. рекорд мощности в непрерывном режиме принадлежал аргоновому ионному лазеру: до нескольких сотен ватт когерентного излучения. Генерация в аргоне идет на сине-зеленых линиях однократного иона, а именно для этих линий имеются самые чувствительные приемники. Впрочем, самый известный приемник излучения - человеческий глаз - тоже наиболее чувствителен к зеленому. Высокая мощность, хорошая когерентность и удобные линии обеспечивали таким лазерам уникальные приложения, например, для связи через атмосферу и океан, для получения голограмм больших объектов, для накачки лазеров на красителе и твердотельных перестраиваемых лазеров.

Активная среда ионного лазера - плазма сильноточного газового разряда - обеспечивает высокую степень инверсии заселенности. Положительная разность заселенностей возникает между возбужденными состояниями ионов в разряде. При удачной конструкции катода и

разрядной трубки удавалось получить до 1 Вт когерентного излучения с 1 см^3 плазмы. Одна из лучших в мире конструкций катода разработана группой В. И. Донина, который в 1979 г. перешел в ИАиЭ СО РАН из ИФП СО РАН. Именно в разряде с таким катодом в секционированной трубке был установлен мировой рекорд мощности. Далее встала задача повышения качества излучения: получение мощной генерации в одночастотном режиме. Кривая насыщения лазера - это зависимость мощности генерации от частоты резонатора. Чем ближе частота резонатора к резонансной частоте активной среды, тем больше мощность. Однако в одночастотном режиме в газовых лазерах вблизи резонанса в силу нелинейного взаимодействия волн, «бегущих» навстречу друг другу, мощность уменьшается. Это явление называют провалом Лэмба. В аргоновом лазере провал Лэмба оказался вдвое шире, чем должно быть по теории.

Существовавшая в то время теория хорошо объясняла форму и ширину провала в гелий-неоновом и других газовых лазерах, но в аргоне она почему-то не работала. С самого начала было ясно, что «виновата» плазма, которая создается в разряде. Однако в плазме протекает много процессов, и необходимо было разобраться, какой же из них уширяет провал Лэмба по сравнению с теорией Лэмба, разработанной в 1964 г. Сначала предполагали, что это эффект ускорения ионов в электрическом поле, поскольку при увеличении скорости иона в поле его резонансная частота сдвигается из-за эффекта Доплера. Однако столб плазмы между катодом и анодом - это достаточно хороший проводник, а электрические поля в проводнике слишком слабы. Теоретикам пришлось заняться поиском других эффектов, и в 1979 г. Г. И. Смирнов и Д. А. Шапиро показали, что провал может уширяться за счет кулоновского рассеяния возбужденных ионов на ионах в основном состоянии. Когда ион быстро пролетает мимо другого иона, он рассеивается на малый угол за счет расталкивания одноименных зарядов. Суммарный эффект от таких малых случайных отклонений такой же, как от случайного блуждания: средний угол равен нулю, а средний квадрат изменения равен произведению частоты столкновений на время. За счет изменения угла продольная скорость возбужденного иона меняется, поэтому из-за доплеровского эффекта провал уширяется. Фактически это то же ускорение иона электри-

ческим полем, но не полем разряда, а случайными микрополями плазмы. Причем уширение должно быть пропорционально квадратному корню из частоты столкновений. На уровне оценок кулоновские столкновения ионов еще в 1960-х гг. рассмотрел известный американский физик Беннет. Но он не догадался насчет диффузии и считал, что уширение пропорционально частоте столкновений. А поскольку частота столкновения в плазме мала, то уширением он решил просто пренебречь.

Расчет уширения свелся к решению квантового кинетического уравнения с интегралом столкновений Ландау. Такой интеграл Ландау предложил для классического кинетического уравнения в 1936 г. С тех пор интеграл успешно применялся в классической кинетике. Например, с его помощью была построена теория процессов переноса в плазме, т. е. рассчитаны коэффициенты диффузии, теплопроводности, вязкости, электропроводности. Он оказался востребованным и в астродинамике (науке о движении коллективов звезд в скоплениях и галактиках), поскольку силы притяжения между звездами также обратно пропорциональны квадрату расстояния. Однако возможность его использования в квантовом уравнении вызвала определенные сомнения. И хотя результаты теории по порядку величины совпали с данными измерений, этого оказалось недостаточно для того, чтобы убедить научную общественность в реальности нового эффекта. Ведь совпадение, по мнению скептически настроенных ученых, могло оказаться случайным. Для полной уверенности не хватало экспериментальной проверки зависимости ширины провала от концентрации, температуры, заряда иона, но осуществить это было сложно. Например, теория предсказывала, что уширение про-

порционально квадратному корню из концентрации заряженных частиц, но ее точное значение было неизвестно.

Относительно низкую концентрацию электронов в плазме тлеющего разряда (порядка 10^{12} частиц в 1 см^3) измеряют зондами Лэнгмюра, высокие концентрации (10^{16}) определяют по штарковскому уширению водородных линий серии Бальмера. Как назло, в сильноточном разряде аргонового лазера концентрация составляла порядка 10^{14} , поэтому традиционные методы были неприемлемы. Такой разряд - самый сложный для измерений. С одной стороны, температура электронов при плотности тока в сотни ампер на один квадратный сантиметр достигает примерно 50000, а ионов - 15000 °С, поэтому зонды быстро сгорают. С другой - штарковское уширение при такой концентрации слишком мало и тонет в шумах. Как же измерить сильноточный разряд?

Ответом на этот вопрос стал совершенно новый метод диагностики, предложенный Г.Н.Алферовым, С.А.Бабиным и В.П.Драчевым, нелинейная интерферометрия.

По сложившейся традиции, полученные новым методом результаты научное сообщество не принимает до тех пор, пока они не согласуются с результатами старых проверенных методик. Довольно много времени и сил понадобилось авторам, чтобы ответить на все критические замечания, но метод был доведен до уровня надежной и точной практической методики и в последующие годы прошел проверку и в магнитной ловушке ИЯФ, и в ТОКАМАКе ИАЭ им. И. В. Курчатова. С помощью нелинейного интерферометра С.А.Бабин и В.И. Донин провели в 1986-1988 гг. эксперименты по проверке зависимости ширины провала Лэмба в аргоновом лазере от

концентрации электронов на двух видимых линиях. Контур провала совпал с предсказаниями теории с достаточно высокой точностью при различных значениях концентрации, температуры, степени ионизации, и воспроизвелись качественные зависимости от параметров плазмы. Опыты на двух ультрафиолетовых линиях ионов аргона кратности 2 дали аналогичные результаты. Таким образом, кулоновская природа уширения провала Лэмба была установлена.

Невозможно не отметить вклад и других сотрудников группы В.И.Донина того времени: А.А.Аполонский записал первые провалы Лэмба в трубках малого диаметра, Т.Т.Тимофеев разработал надежную разрядную трубку промежуточного диаметра, Н.В.Голдина обеспечила группу многослойными зеркалами, Д.В.Яковин и А.С.Яценко измерили частоты неустойчивостей разряда в трубках разного диаметра и обнаружили закон подобия, а А.В.Родишевский из лаборатории В.С.Львова написал первые программы для статистической обработки экспериментальных данных.

Комбинационный лазер

Теперь о более поздних результатах по нелинейной спектроскопии плазмы, полученных в нашем институте. В 1988 г. в работе С.Г. Раутиана и Д.А. Шапиро были рассчитаны эффекты кулоновских столкновений в трехуровневой системе. Поскольку такая система гораздо богаче эффектами, чем двухуровневая, то даже в простейшем приближении слабого насыщения обнаружился ряд новых интересных эффектов. В 1990 г. проект по комбинационному ионному лазеру выиграл конкурс Сибирского отделения АН. В ИиАЭ был создан творческий молодежный коллектив, который впоследствии преобразовался в тематическую группу перестраиваемых лазеров. Комбинационный лазер основан на трехуровневой системе. Излучение лазера на красителе настраивается в резонанс с переходом иона, а на смежном переходе генерируется излучение другой частоты. В эксперименте на ионах

аргона красное излучение преобразуется в синее. В таком лазере удалось найти практическое применение кулоновскому уширению. За счет диффузии для генерации лазера использовалось большинство ионов, поэтому эффективность конверсии излучения получилась рекордной, даже выше, чем в классических экспериментах известного немецкого ученого Веллегеаузена.

Для высокоэффективной конверсии требовалось подобрать хорошую схему уровней. Использовали «долгоживущий» метастабильный уровень с «бесконечным временем жизни», как упоминается в обзорах. Физическая «бесконечность» отличается от математической и просто означает, что скорость распада уровня настолько мала, что ее невозможно измерить. До «бесконечности» метастабильному уровню не дают «дойти» столкновения с электронами, но все равно его жизнь достаточно долгая. На этом уровне установлен и рекорд по кулоновскому уширению - в 1997 г. наблюдалось уширение в 100 раз, тогда как раньше на лазерных уровнях - в 2-4 раза.

Эффекты сильного поля

Теорию трехуровневых систем удалось обобщить на случай сильного поля, учесть зависимость коэффициентов диффузии от скорости, интерпретировать не только эксперименты, выполненные в ИАиЭ, но и опыты итальянской и двух немецких групп. В последние годы также было получено несколько интересных результатов.

Первый - это нелинейный интерференционный эффект в зеэмановском лазере. Согласно теории, нелинейный интерференционный резонанс не уширяется столкновениями, но наблюдать его можно только при точном равенстве длин волн полей на смежных переходах трехуровневой системы. Именно такая ситуация возникает, если поместить разрядную трубку в продольное магнитное поле. Уровни атома сдвигаются за счет эффекта Зеэмана, но когда магнитное поле стремится к нулю, частоты переходов стано-



Тематическая группа 01-4 перестраиваемых лазеров в комнате 103 (2001 г.).
Верний ряд:
М.А. Рыбаков,
С.А. Бабин,
Д.В. Чуркин,
В.В. Потапов,
Ю.И. Белоусов,
С.И. Каблуков,
М.Г. Степанов.
Нижний ряд:
Д.А. Шапиро,
С.Н. Пензина.

Защита кандидатской диссертации М.Г. Степановым в конференц-зале (1999 г.).





А. А. Заболотский



Е. Г. Шапиро



А. И. Черных



Е. В. Подивилов

вятся в точности равными. Следовательно, можно ожидать резкого изменения мощности вблизи нулевого поля. Этот эффект был обнаружен экспериментально и рассчитан теоретически.

Второй интересный эффект проявился в поле стоячей волны. Если поместить ион в поле сильной стоячей волны и наблюдать за поглощением на соседнем переходе, то вблизи резонанса поглощение уменьшается. В зарубежной литературе этот эффект называют электромагнитно-индуцированной прозрачностью, а в отечественной - полевым расщеплением. Этот пик прозрачности собирались пронаблюдать на ионах аргона и даже создали систему автоматизации эксперимента, но неожиданно оказалось, что пик в сильном поле и сам расщепляется на два. Теория трехуровневой системы в поле стоячей волны была разработана в начале 1970-х гг. американскими физиками Фелдманом и Фелдом, но в их статьях ни о каком расщеплении не было и речи. Оказалось, что они не до конца проанализировали собственные уравнения и пропустили область параметров, где появляется новый эффект. Физическая причина эффекта высшие гармоники, которые возникают из-за нелинейного взаимодействия встречных волн. Ширина провала между парой пиков электромагнитно-индуцированной прозрачности ока-

залась больше, чем по теории Фелдмана и Фелда. Очевидно, что уширение провала обусловлено кулоновским взаимодействием ионов. Для его объяснения в теории пришлось учесть так называемый «фазовый эффект», который в двухуровневой системе был несущественным. Если несколько ионов в начальный момент имеют одинаковые скорости и координаты, то через несколько столкновений у них появится разброс по скоростям, а вследствие этого - и по координатам. Когда разброс по координате достигает длины волны, ион уходит из пучности стоячей волны, и провал уширяется.

Важный вклад в эксперименты внесли С.В.Хорев, который проверил кулоновское уширение в криптоне; С.И.Каблуков, обнаруживший экспериментально гомогенизацию уширения на метастабильном уровне; М.И.Кондратенко, измеривший форму интерференционного резонанса в магнитном поле; В.В. Потапов, обнаруживший резонанс стоячей волны в спектре пробного поля. Пионерские результаты в теории получили Л.А.Гельмедова, построившая теорию генерации комбинационного ионного лазера; К.Б.Курлаев, рассчитавший кривую насыщения; Е.В.Подивилов, придумавший, как вычислить эффект Дике в плазме с чандрасекаровским тензором диффузии; М.Г.Степанов, который вывел физику

кулоновского уширения за рамки теории возмущений по электромагнитному полю; А.И.Черных и О.В.Белай, разработавшие численные методы и написавшие программы для решения квантового кинетического уравнения с интегралом Ландау.

К настоящему времени основные моменты физики кулоновского уширения в двух- и трехуровневых системах поняты, а результаты, полученные в ИИЭ СО РАН, признаны научной общественностью. По этой теме опубликованы статьи в журналах: «Physical Review Letters»,

«Physical Review A», «Physics Reports» и др. С 1979 по 2004 г. только в «ЖЭТФ» и «Письмах в ЖЭТФ» вышло 12 работ, посвященных этому направлению. По итогам защищены две докторские и четыре кандидатские диссертации, главы, посвященные кулоновскому уширению, вошли в две монографии. Чтобы разобраться в этих многочисленных и сложных плазменных процессах, потребовалось немало времени и усилий многих людей. Но и их оказалось бы недостаточно, если бы не тесный союз физиков-теоретиков с экспериментаторами.



Слева направо:
С.А. Бабин,
А.И. Черных,
Е.В. Подивилов,
А.А. Заболотский,
А.А. Власов,
С.И. Каблуков,
Д.А. Шапиро,
С.Г. Игнатович,
М.А. Никулин,
С.Р. Абдуллина,
Д.М. Афанасьев.