

~~История обнаружения «квантовых биений» в люминесценции~~

## ИСТОРИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ «КВАНТОВЫХ БИЕНИЙ» В ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ.

Е. Б. Александров

Мне предложено рассказать об истории обнаружения «квантовых биений» в люминесценции, поскольку я был причастен к этой теме в начале моей деятельности в Государственном Оптическом Институте им. С. И. Вавилова. Тема квантовых биений была совершенно не типична для отраслевого института, возникла она случайно как результат моих попыток самообразования в атомной спектроскопии. Я окончил в 1960 году Политехнический институт, получив диплом по кафедре физики изотопов, которой тогда заведовал Б. П. Константинов, молодой директор Физико-технического института. Я со школьных лет был привержен к физико-химическим опытам, по примеру моего отца, который был профессиональным физиком, работавшим в физтехе с начала 30-х годов и читавший курс общей физики в Политехническом институте. Но по окончании института я попал не в Физтех, где меня знали с моего пятилетнего возраста, а в ГОИ, куда меня сманил А. М. Бонч-Бруевич, читавший нам курс электроники. Он был известен как человек, который впервые подтвердил второй постулат теории относительности, за что получил докторскую степень, и который собирался ставить эксперименты по обнаружению нелинейных эффектов в гравитации. Звучало это очень романтично, а человек он был яркий и умеющий обольщать.

В ГОИ я попал в лабораторию люминесценции, которую основал ещё С. В. Вавилов. Группа Бонч-Бруевича занималась довольно вялым изучением модной тогда электролюминесценции, из которой тогда ничего не вышло, она в дальнейшем возродилась уже в лазерно-светодиодном облики и не в ГОИ, а в Физтехе. Ничего не вышло и из попыток Бонч-Бруевича заняться проблемами гравитации, и я некоторое время оставался безработным, пока П. П. Феофилов не предложил мне заняться воспроизведением недавних интересных работ Альфреда Кастлера по оптической ориентации атомов. Это был тогда обычный путь развития советской академической науки – повторять сделанное за границей. Никакой конкретной задачи для меня не ставилось – повторить и войти в курс дела. Для меня это оказалось делом очень трудным, но и продуктивным. Я читал оригинальные статьи и выяснил, что ничего не понимаю – базовое образование оказалось совершенно бесполезным. Я просидел в библиотеке несколько месяцев, разбираясь в основах атомной спектроскопии и в теории магнитного резонанса. Одновременно я конструировал и готовил экспериментальную установку, используя огромные возможности ГОИ. Возможности эти базировались на безмерном количестве разномастной немецкой оптики, вывезенной из побеждённой Германии. В частности, по ящикам у сотрудников можно было найти интерференционные фильтры, газоразрядные лампы, среди которых нашлись уникальные мощные натриевые лампы, с которыми я и начал экспериментировать. (Натриевых ламп в ГОИ делать не умели, потому что пары натрия быстро разрушали стекло, а у немцев были стёкла с защитными покрытиями. Этими лампами немцы ещё до войны освещали свои автобаны – лампы эти отличались очень высокой светоотдачей). Мне удалось в короткое время продемонстрировать так называемую оптическую накачку Кастлера. Здесь, вероятно, все знают, что это такое, а тогда это была большая новинка. По существу Кастлер впервые продемонстрировал

глубокую оптическую нелинейность, сильно изменяя распределение населённости атомов в парах по подуровням основного состояния. Это оказалось возможным без лазерных интенсивностей возбуждающего света за счёт очень больших времён релаксации атомов в основном состоянии. Создав такое резко неравновесное распределение населённости атомов по подуровням основного состояния, используя селективное оптическое возбуждение, можно было в дальнейшем восстанавливать тепловое равновесие с помощью внешнего электромагнитного поля. Это открывало интересные приложения этой техники в области точного измерения частот внутриатомных переходов в радиочастотной и микроволновой областях в интересах создания стандартов частоты и техники измерения магнитных полей. Кроме того, это открывало возможность осуществления радиоприёма с предельно возможной чувствительностью. Поэтому эта техника привлекла внимание военных, а я оказался среди первопроходцев этой техники в СССР. Нашу лабораторию посещали разные делегации из других институтов Академии Наук и университетов, а также из отраслевых НИИ. У меня вскоре появилось множество последователей и конкурентов. Заниматься военной тематикой мне не хотелось, да ещё в обстановке гонки и конкуренции, и я стал искать исследовательские аспекты этих занятий<sup>1</sup>. Я не нашёл никаких полезных советов у старшего поколения и пустился во всякие фантазии в области основ квантовой механики, которая в этих опытах выступала в первозданной красоте.

Прежде всего, я никак не мог смириться с концепцией корпускулярно-волнового дуализма. По мере чтения литературы я убедился, что нахожусь при этом в весьма неплохой компании – Планка, Зоммерфельда, Эйнштейна, Де-Бройля все они мучились примерно одними и теми же вопросами. Ну, вот, например: пусть есть классический осциллятор, или возбуждённый атом, который также описывается классически как колеблющийся электрон в поле центрального положительного заряда. Этот излучатель будет служить источником классической электромагнитной волны с известной гладкой диаграммой направленности – эдакая восьмёрка. Если мы поставим справа и слева светочувствительные экраны, мы эту диаграмму направленности обнаружим по картине, например, потемнения фотоэмульсии. Всё будет хорошо, пока мы не заинтересуемся кинетикой образования этого потемнения. Допустив идеальный фотоприёмник в виде субмикронной матрицы, мы обнаружим, что накопление происходит в виде дискретных событий, как если бы источник испускает поток частиц, которые получили название кванты или фотоны. Но если я по дороге от источника к матрице поставлю какие-то экраны с отверстиями или щелями, то я неминуемо обнаружу явления дифракции и интерференции, причем, при сколь угодно малой интенсивности источника. Откуда появляется вечный парадокс – с одной стороны, фотон – это пулька, а с другой стороны, она же волна, способная интерферировать сама с собой. Как из этого парадокса выкручивается копенгагенская трактовка квантовой механики – мы знаем. Она говорит о том, что есть квантовые частицы – фотоны, поведение которых описывается волнами вероятности, которые правильно описывают результат любого эксперимента. Однако, это

---

<sup>1</sup> Избежать вовлечённости в оборонные программы мне не удалось. В одной из публикаций тех лет я опубликовал проект магнитометра, способного регистрировать исчезающе слабые поля. Через несколько лет эта идея была экспериментально продемонстрирована в группе Каствлера, которая любезно сослалась на мою работу, и на меня спикировало министерство обороны СССР, в интересах которого я работал 30 лет.

волна не материальная, и потому в момент регистрации единичного события она редуцируется, исчезая одновременно во всём пространстве, в чём нет ничего удивительного, потому что она в качестве физической реальности и не существовала, будучи волной предсказания.

Я тогда быстро дошёл до радикального отрицания идей квантов энергии, построив для себя некий суррогат полуклассического объяснения дискретности регистрации фотонов. Я решил, что всё станет на место, если принять существование классического электромагнитного поля, которое квантуется фотоприёмником: у фотоэлектрона имеется критическая энергия, приобретя которую во внешнем поле, он отрывается, что и делает акт регистрации дискретным. И это легко продемонстрировать, достаточно исследовать фото эмиссию при последовательно уменьшающейся интенсивности света – она должна прекратиться, если учесть процессы релаксации осциллятора, которые не дадут ему накопить нужную для отрыва от атома энергию. И, казалось бы, такое явление наблюдается. Все фотографы знают, что очень слабый свет не засвечивает плёнку. Я, конечно, разговаривал с умными людьми. Перель мне сказал, что я по существу прогнозирую нелинейность фотоответа при снижении интенсивности. По его мнению, нелинейности возникают только при высоких интенсивностях. Я был готов всё же ставить такие опыты, но случайно наткнулся на абзац в книге Зоммерфельда. Как оказалось, Зоммерфельд за сорок лет до меня задавал такие же вопросы и придумал много более убедительный опыт. Если допустить непрерывность потока энергии электромагнитного поля, каковой поток проходит через эффективное сечение нашего осциллятора и раскачивает его до критической амплитуды, то надо ожидать, что с уменьшением интенсивности потока потребуется всё большее время для того чтобы раскачать осциллятор. Зоммерфельд исследовал распределение отсчётов счётчика Гейгера с момента включения рентгеновского источника. Оказалось, что первый отсчёт счётчика возникает без задержки после включения источника, с уменьшением его интенсивности убывает только средняя частота срабатывания счётчика!

Таким образом, приходилось признать, что электромагнитное излучение представляет собой поток энергетических пуль. При фиксированной частоте э.-м. поля эти пули имеют фиксированную энергию  $h\nu$ , а интенсивность поля меняет только плотность потока пуль. (Именно за формулировку этой идеи Эйнштейн получил Нобелевскую премию, а не за СТО или ОТО!). Была и вторая сторона этой парадоксальной ситуации – как происходит процесс испускания фотона возбуждённым атомом. С одной стороны, это сугубо импульсный процесс, а с другой стороны, ширина спектральной линии, испускаемой атомом, определяется его средним временем жизни. Когда я с эти недоумением пришёл к Феофилову, он сказал мне, что много людей до меня на этих вопросах спятили.

Среди посещавших меня визитёров оказался Г. В. Скродцкий из Уральского политехнического института, заведующий кафедрой парамагнитного резонанса, который легко выезжал за границу, откуда он вывез отчёт о первой международной конференции по оптической накачке 1959 г. в Анарборе. Там было много интересных статей, из которых две оказались для меня особенно важными. Обе были экспериментальные. В одной сообщалось о таинственном резонансном увеличении интенсивности флуоресценции метастабильного гелия в зависимости от магнитного поля. В другой статье (Джорджа Сириеса) описывался опыт по наблюдению модуляции света люминесценции

ртути в условиях индуцированного магнитного резонанса в возбуждённом триплетном состоянии. Сириес прямо связывал модуляцию интенсивности люминесценции с образованием когерентной суперпозиции атомных состояний. Что касается первой статьи о странном резонансе в гелии, то как раз в это время вышла в *Physical Review* статья Питера Франкена, в которой автор объяснял этот эффект, назвав его эффектом пересечения уровней, совершенно справедливо считая этот эффект обобщением старинного эффекта Ханле, где так же пересекаются атомные уровни, но только в нулевом магнитном поле. В этой статье меня впечатлили слова Франкена о «спектре фотона»<sup>2</sup>. Франкен говорил о том, что в окрестности пересечения уровней возбуждённого состояния возбуждающий фотон с достаточно широким спектром может рассеиваться на обоих пересекающихся уровнях, что приводит к интерференции рассеянных волн. Пока уровни обладают разной энергией, интерференция невозможна, потому что она нестационарна во времени. А в точке пересечения появляется интерференционный вклад в интенсивность. И тут я стал думать, а почему бы не наблюдать нестационарную интерференцию – биения, вызванные интерференцией состояний с различной энергией? Именно такая интерференция наблюдалась в опыте Сириеса. Но у него она вызывалась внешним когерентным полем, вызывавшем магнитный резонанс. Обязателен ли этот резонанс, раз интерференция возникает вместе с актом возбуждения?

Надо заметить, что 50 лет назад привычные в квантовой механике слова о том, что произвольное состояние может быть представлено в виде дискретной или непрерывной суперпозиции состояний с определённой энергией, воспринимались практически всегда как утверждение о том, что при измерении энергии система оказывалась в одном из собственных состояний оператора энергии, и вероятность такого результата равнялась квадрату модуля при соответствующем коэффициенте разложения. Иными словами, спектроскописты всегда мыслили в терминах населённостей энергетических уровней. Слова же о когерентной суперпозиции состояний, или, что то же самое, об интерференции состояний, следовало трактовать как об одновременном присутствии одной частицы в двух или многих энергетических состояниях. В частности, при интерференции двух верхних подуровней можно ожидать, что такой суперпозиционный атом будет испускать две линии одновременно. В классической интерпретации мы будем наблюдать биения интенсивности с частотой, равной разности энергии интерферирующих состояний. Осознав это, я тут же сообразил, что ансамбль подобных атомов будет испускать свет, в котором будет подчеркнута частота биений в спектре интенсивности. Почему? Потому что каждый атом будет испускать модулированное на общей частоте излучение. Почему общей? Потому что разность энергий в очень малой степени подвержена доплеровскому разбросу – просто из-за малости этой частоты. То обстоятельство, что фазы этих колебаний интенсивности случайны, не мешает обнаружению этих колебаний, потому что сумма синусоид со случайными фазами – это тоже синусоида на той же частоте. Другое дело, что амплитуда этих колебаний будет мала – пропорциональна корню из интенсивности синфазных колебаний, но, в принципе, её, казалось бы, можно обнаружить.

---

<sup>2</sup> 40 лет спустя Питер Франкен посетил ГОИ, и я, будучи в это время заместителем директора по науке, был приглашён на встречу с гостем. Я рассказал ему, что его статья в *Phys. Rev.* 1961 году была для меня тогда откровением, которое определило мою работу на следующие десять лет. Он с интересом меня выслушал и сказал, что ничего не помнит об этой статье!

Чем я тут же и занялся, простодушно поместив кадмиевую лампочку в магнитное поле и попытавшись обнаружить пик в спектре шумов её излучения на частоте расщепления уровней состояния  $5^3P_1$  в магнитном поле. Я очень старался, но ничего не обнаружил!

Я был обескуражен, но решил, что мне нехватает чувствительности, и я решил увеличить эффект, сфазировав колебания отдельных атомов. Как это сделать, было делом очевидным. Самым элементарным приёмом было бы применить импульсное возбуждение ансамбля атомов за время, много более короткое, чем период биений. С проработки этого подхода я и начал. Я решил выбрать весьма долгоживущее возбуждённое состояние, чтобы снизить требования к краткости импульса. Я решил использовать импульсную лампу, с помощью которой легко получить импульс света с длительностью порядка микросекунды. Я собирался возбудить пары цинка на интеркомбинационном переходе белым импульсом импульсной лампы, наблюдая в поперечном направлении за кинетикой света люминесценции. Однако оказалось, что, во-первых, паразитный рассеянный свет от возбуждающей лампы на несколько порядков превышал интенсивность люминесценции. А во-вторых, спектральная яркость импульсной лампы оказалась много меньше, чем яркость газоразрядной спектральной лампы. Познакомившись с методами импульсной модуляции света спектральной лампы, я убедился в том, что светосила существующих модуляторов света типа ячейки Керра безнадежно мала. И я оставил идею демонстрации биений при импульсном возбуждении.

Тогда я решил попытаться продемонстрировать биения в виде стационарного резонанса. Я был хорошо подготовлен в радиотехнике и хорошо знал, что раскачать любой затухающий периодический процесс можно с помощью периодического возбуждения. Т. е., нужно было возбудить люминесценцию светом, модулированным по амплитуде на достаточно высокой частоте и обнаружить модуляцию люминесценции при условии совпадения частоты модуляции с частотой расщепления возбуждённых подуровней. Частота модуляции должна быть много выше обратного времени естественного затухания возбуждённого состояния – в этом случае будет наблюдаться выраженный резонанс, потому что вне резонанса модуляция люминесценции будет подавлена в меру превышения времени жизни над периодом модуляции интенсивности возбуждающего света. В качестве объекта эксперимента я выбрал кадмий, время жизни первого возбуждённого состояния которого  $5^3P_1$  было около 2 мкс, а люминесценция возбуждается на линии удобного близкого ультрафиолета – 326,1 нм. Были в моём распоряжении и очень яркие кадмиевые лампы типа Белла и Блюма. Конечно, опять вставал вопрос, как модулировать свет на высоких частотах – порядка мегагерца или выше. Связываться со стандартными модуляторами мне не хотелось, и я решил просто замодулировать питание лампы. Тут же оказалось, что достигаемая при этом глубина модуляции весьма мала – порядка 1 % на частоте 1 МГц. Малость глубины модуляции обуславливалась двояко – из-за инерционности плазмы разряда (разряд гас за время порядка сотни микросекунд) и за счёт инерционности возбуждённого состояния кадмия. Но малость глубины модуляции компенсировалась высокой чувствительностью регистрации этой модуляции. Света люминесценции было много, причём шумы, на фоне которых проводилась регистрация регулярного сигнала мало отличались от дробовых. Наконец, техника принудительной модуляции допускала применение синхронного детектирования, которым я полностью владел. При фиксированной частоте модуляции лампы я организовал медленное

сканирование магнитного поля и записывал сигнал с выхода синхронного детектора в функции от напряжённости поля. Я тут же получил уверенный сигнал, форма которого менялась от лоренцевой до дисперсионной в зависимости от фазы опорного напряжения фазового детектора. Я назвал этот эффект резонансом биений и опубликовал короткую заметку в O&S. Кафедра оптики физфака (в лице Н. И. Калитеевского и М. П. Чайки) пригласила меня рассказать об этой работе на семинаре. Я рассказывал об этой работе, прибегая к еретической терминологии типа «спектр фотона» и «двухгорбый фотон», чем вызвал законное недоверие со стороны приглашённых на семинар теоретиков из Физтеха – Переля и Константинова. Перель вышел к доске и сказал, что всякая там интерференция состояний здесь не при чём, а просто я наблюдал биения двух компонент спектральной линии кадмия, расщеплённой в магнитном поле. Объяснение было совершенно неудачным, и я его легко опроверг, обратив внимание критика на то, что в поле порядка 1 Гс расщепление линии составляет всего порядка мегагерца, в то время, как ширина оптических линий определяется доплеровским уширением, имеющим порядок 1 ГигаГерц. Мой же резонанс имеет ширину порядка 100 кГц. Кроме того, сигнал биений от двух доплеровских линий имел бы спектральную плотность на многие порядки меньше плотности дробового шума, т.е., был бы ненаблюдаем. Перель спорить не стал. Вместо этого они с Константиновым срочно написали теорию моих биений на базе техники матрицы плотности и применяя как полуклассическое, так и квантовое описание. Статья была напечатана в ЖЭТФе и была принята мировым сообществом с большим интересом, весьма способствовал моей известности. Далее мы с ними тесно сотрудничали. В частности, они подтолкнули меня на реализацию других способов синхронизации биений. С их подачи я продемонстрировал так называемый параметрический резонанс, возникающий при модуляции энергетического расстояния между интерферирующими подуровнями на характерных резонансных частотах. Это гораздо более сложное явление и не столь очевидное, как амплитудный резонанс биений. Я не буду на нём останавливаться, потому что параметрический резонанс в дальнейшем не получил широкого распространения, как и фазовый резонанс биений, возникающий при гармонической модуляции начальной фазы биений. И уж совсем экзотическим оказался релаксационный резонанс биений, при котором модуляции подвергалась не амплитуда, не частота или фаза биений, а время затухания. До этого резонанса мы не додумались – это было сделано позже учеником Переля Окуневичем. После публикации нескольких статей на эти темы – я, в частности, продемонстрировал эффективность применения метода биений для целей спектроскопии, измерив константу штарковского расщепления уровня  $5^3P_1$  кадмия, я получил приглашение на конференцию по квантовой электронике в Лондоне от Сириеса. Туда меня, конечно, не пустили. Следующая конференция была в Румынии, куда отправилась и делегация от ГОИ, но опять без меня. На этой конференции был Кастлер, которому П.П. Феофилов рассказал о том, что я только что продемонстрировал биения при электронном возбуждении. Кастлер очень возбудился и стал ругать своего сотрудника Пебая-Пейруля за то, что тот не сделал этого раньше. Последствием этого разговора была срочная публикация во французском журнале статьи о биениях при электронном возбуждении безо всякой ссылки на меня! Эта статья вышла раньше моей, и мой приоритет можно было установить только по дате подачи материала в редакцию.

Феофилов и Бонч-Бруевич предложили мне писать кандидатскую диссертацию, что я и сделал в 1964 году. Подготовка к защите была сопряжена с элементами скандала. По

правилам ГОИ должна была быть предзащита с рецензентом. Мне отвели в таком качестве Б. С. Непорента, который меня знал и одобрял. Он предложил мне самому написать на себя рецензию. Я написал её с рядом замечаний и с положительным заключением. Но на процедуре предзащиты всё пошло неожиданно. Непорент, выслушав мой доклад, отнёсся к моей работе резко недоверчиво. Он задавал мне вопросы, на которые я легко отвечал, но он не был удовлетворён. В конце он сказал, что не знает, как объяснить мои экспериментальные результаты, но, во всяком случае, не так, как я это делаю! В это время, присутствовавший на предзащите академик Теренин встал и спросил, знаю ли я работы Руппа, который, де, ещё в 30-х годах всё, о чём я рассказываю, уже опубликовал. Я ответил, что ничего об этом не знаю и прошу у Теренина ссылки. Теренин на это ответил – «Не волнуйтесь. Этот Рупп оказался жуликом!» И с этими словами он вышел из зала заседаний. Я находился в отчаянном положении – предстояло зачитывание отзыва Непорента, который был в полном противоречии с его оппозицией моей диссертации. Непорент взял отзыв и целиком его зачитал, не изменив ни слова! Я понимал, что он попал в совершенно дурацкую ситуацию. Но, похоже, понимал это только я. Дальше всё пошло по стандартному сценарию – диссертацию одобрили и рекомендовали к защите. Все разошлись, а я пошёл в кабинет к Непоренту. Застал его с его пассией – у них был серьёзный разговор! Непорент нетерпеливо взглянул на меня – что мне надо? Я спросил его – а если я продемонстрирую ему колебательную кинетику спонтанного распада атома – он поверит в мои доводы? Он легко согласился – поверю, и я испарился. После этого я пошёл в кабинет Бонч-Бруевича, у которого спросил, что это такое говорил Теренин. Бонч-Бруевич ответил – это было просто академическое хамство. Теренин элементарно ревнует к Вашим успехам. Этот Рупп, действительно, писал в журналы отчёты о не производившихся им опытах, это был род сумасшествия. Никакого отношения к вашим работам это не имело. Забудьте!

Забыть это было трудно, но мне предстояла защита, а с ней – подбор оппонентов. Мне посоветовали обратиться к С. Э. Фришу – за меня ходатайствовал Феофилов. Фриш почитал мой автореферат и напугался его революционности (каковой в нём не было!) Он связался с М. А. Ельяшевичем, белорусским академиком, и тот за меня поручился – дескать, всё правильно! Защита состоялась осенью 1964 года и прошла опять с элементами скандала. Первым выступил начальник теоретического отдела ГОИ Власов, который спросил, в каком отношении находится моя работа с «осуждённой теорией химического резонанса» Лайнуса Полинга? Я струсил, поняв, что мне «шьют политику» – идею Полинга о наложении различных электронных конфигураций бензола наши философы осудили как идеалистическую. Общность, конечно, была – принцип суперпозиции состояний, но существенно разных, на чём я и сыграл. Потом похвально выступили оппоненты и, внезапно, произошло явление Гросса народу. Оказалось, что в зале присутствует член-корреспондент АН Евгений Фёдорович Гросс, который крайне темпераментно выступил, закончив так: «Больше хвалить Александра невозможно. Я предлагаю сразу присвоить ему степень доктора наук». Председатель сказал, что сразу это сделать невозможно – нужен дополнительный оппонент и другой учёный совет, но можно рекомендовать повторить защиту этой же диссертации на степень доктора. На этом и решили. Но я считал, что диссертацию надо доработать. И, в частности, осуществить эксперимент с импульсным возбуждением биений, который убедит Непорента. К этому времени мне стало известно, что такой эксперимент с парами ртути готовят англичане. И

вот, началось соревнование. Повторилась история с французами – я англичан обогнал, но они опубликовались раньше. Правда, их результат был совершенно никудышным по убедительности. Выбранный мной объект – опять кадмий – был много удачней. Время жизни возбуждённого состояния кадмия было на порядок больше, чем у аналогичного состояния ртути, что сильно облегчило задачу формирования оптического импульса возбуждения. Требуемый короткий импульс мог быть на порядок более длинным и при равной яркости источника содержал на порядок больше фотонов возбуждения. Было ещё два преимущества моей версии опыта – 1) мне удалось сконструировать много более ; и 2) я разработал много более эффективную систему подавления шумов за счёт накопления. Дело в том, что англичане за один импульс возбуждения ртути получали в среднем 1/50 фотоэлектрона от света люминесценции. Без накопления сигнала ничего увидеть было нельзя в принципе. Они использовали стандартный приём так называемой электронной щели: в канале регистрации сигнал проходил только в течение короткого времени, которое последовательно сдвигалось относительно стартового импульса. При каждом положении щели регистрировались десятки тысяч импульсов, так что постепенно происходило накопление кинетики сигнала. Техника эта была на грани возможностей тогдашней электроники. Зная всё это, я решил прибегнуть к совершенно другой технике накопления в духе «голь на выдумки хитра». Я решил просто фотографировать экран осциллографа, на котором отображалась кинетики люминесценции. Если фотографировать на один кадр десятки тысяч осциллограмм, то шумы должны усредниться, а систематические черты осциллограммы должны были обнаружиться. Я эту технику сначала проверил на чисто методическом опыте, в котором я наложил белый шум на регулярный электрический сигнал. На одиночной осциллограмме никаких следов исходного импульса обнаружить было нельзя, но синтетическая фотография обнаруживала исходный импульс в первоизданной красоте.

И вот с этой техникой я взялся за обнаружение биений при импульсном возбуждении. Пришлось разработать и сделать импульсный источник высоковольтных импульсов, которые прилагались к электрооптическому затвору. (Дело было не простое – требовался импульс напряжения около 5 кВ с длительностью порядка  $10^{-7}$  с. И ещё нужно было избавиться от высоковольтных импульсных наводок на канал регистрации. Для этого весь тиратронный генератор импульсов был собран внутри толстостенного красномедного экрана.) Затвор был сделан на основе кристалла дигидрофосфата калия, который мне любезно подарили сотрудники института кристаллографии. Это был уникальный затвор по светосиле – его пропускание для параксиального пучка света 3261 А составило 10 %. В целом, я достиг выхода около 50 фотоэлектронов при регистрации света люминесценции в пересчёте на один импульс возбуждающего света. Это было в 2500 раз больше, чем в работе англичан. Но у меня ещё было огромное преимущество в технике накопления. Англичане копили сигнал в течение 15 часов и получили соотношение сигнала к шуму порядка 1! У меня время накопления составляло десятков минут, и при этом я получил сигнал биений с отношением к шуму порядка 100. Сигнал не вполне соответствовал идеальному – глубина модуляции была около 50% вместо 100%. Но это полностью объяснялось конечностью возбуждающего импульса и сложной естественной смесью изотопов кадмия с различными гиромангнитными отношениями возбуждённого состояния.



С этим достижением я уже с чистой совестью вышел на защиту докторской диссертации в 1966 г., двумя годами после защиты кандидатской диссертации. Но после этого я уже больше не продолжал заниматься темой биений – у меня появилось множество конкурентов в Европе и в США, обладавшими новыми возможностями, главным образом в связи с развитием техники перестраиваемых лазеров. Возникло и особое направление изучения биений, связанное с высоко энергичными пучками ионов, которые перезаряжались и возбуждались при прохождении пучков через тончайшие фольги из, например, углерода (так называемая beam-foil technique). Мой шеф Бонч-Бруевич переключил меня на тему модной тогда голографии, в области которой я, правда, ограничился одной оригинальной публикацией, имевшей в дальнейшем очень большую цитируемость. Но в ГОИ занятия голографией, естественно, перешли далее в ведение Ю. Н. Денисюка, под которого в ГОИ был создан целый отдел.

Я же вернулся к своему первому увлечению – к вопросу о физике фотона. Я по-прежнему возлагал надежды на спектроскопию шумов интенсивности, несмотря на то, что мне не удалось в шумах интенсивности люминесценции кадмия обнаружить биений, связанных с интерференцией магнитных подуровней возбуждённых состояний. Я привлёк к обсуждению проблемы выдающегося математика ГОИ В. П. Козлова, который навёл порядок в количественных оценках ожидаемого эффекта. Из этих оценок следовало, что гораздо больше шансов на положительную реализацию имеет эксперимент по обнаружению характеристического пика спектральной плотности шума интенсивности люминесценции в окрестности нулевых частот с полушириной на уровне обратного времени жизни возбуждённого состояния атомов. Величина этого пика ожидалась равной фону дробового шума при условии равенства 1 квантового выхода приёмника и при сборе света в полном телесном угле. (При попытке наблюдения шумов на частоте биений телесный угол сбора был неминуемо ограничен, потому что биения всегда полностью исчезают при интегрировании по пространству). Исходя из этих перспектив был спроектирован эксперимент по изучению спектра шума (спектра интенсивности) люминесценции паров ртути на традиционном переходе  $6^1S_0 \Rightarrow 6^3P_1$ . Специальная кварцевая кювета с парами ртути при фиксированной температуре возбуждалась светом ртутной лампы, и свет люминесценции собирался с помощью сферического зеркала на катод фотоумножителя. Сигнал с нагрузки фотоумножителя подвергался спектральному анализу, в ходе которого сопоставлялась мощность шума в двух спектральных полосах. Центр одной полосы был много меньше обратного времени жизни атомов ртути в состоянии  $6^3P_1$ , а вторая полоса, наоборот, была центрирована на частоте, много большей этого обратного времени жизни. Сравнение мощности шума в этих двух полосах было целью эксперимента, потому что результат такого сравнения давал однозначный ответ о физике процесса спонтанного испускания. Сравнивались две гипотезы: 1) в рамках полуклассического подхода атом испускает экспоненциально затухающий пакет электромагнитного поля с частотой, центрированной на частоте перехода. При этом в спектре шумов интенсивности ожидается пик избыточных шумов в окрестности нулевых частот. 2) В рамках квантового описания спонтанное излучение сводится к импульсному рождению фотона, вероятность которого во времени падает экспоненциально с момента возбуждения атома. При этом никакого подъёма спектральной плотности шума в окрестности нулевых частот не ожидается. Никакого пика не было обнаружено, так что проведенный эксперимент с очень высокой надёжностью (более 95%) свидетельствовал в

пользу квантовой гипотезы. Эта работа была опубликована в 1974 г. – «Спектр шумов спонтанного излучения», *Е.Б.Александров, В.П.Козлов, В.Н.Кулясов, ЖЭТФ, т. 66, вып.4, стр. 1260-1282*. Работа легла в основу кандидатской диссертации моего аспиранта В. Н. Кулясова, с которым мы вместе проводили этот опыт. Защита этой диссертации была весьма драматической, потому что диссертация получила отрицательный отзыв от ведущей организации - от Института спектроскопии АН СССР (ИСАН). Инициатором отзыва был директор ИСАНа С. Л. Мандельштам, который возмутился амбициозности этой кандидатской диссертации и заявивший, что «это одно из двух – или величайшее открытие, или великий обман» (Это высказывание было сделано по-немецки, но я не запомнил оригинала). Впору было вспомнить реакцию А. Н. Теренина! Мне пришлось самому «защищать» эту диссертацию на заседании учёного совета ИСАНа. Защита прошла совершенно успешно, и Мандельштам заверил меня, что будет прислано новое положительное заключение. Но в ГОИ через неделю снова пришло резко отрицательное заключение! Мы решили не уступать и идти на защиту с таким отягчением. Эта рецензия была всё же отозвана телеграммой из ИСАНа в день защиты диссертации Кулясова в ГОИ. Позже мне рассказывал И. И. Собельман, принимавший участие в этой «предзащите» в ИСАН, что сыр-бор разгорелся из-за ревнивой позиции директора института С. Л. Мандельштама, который рассматривал меня в качестве своего главного конкурента на предстоящих выборах в Академию наук. (В 1972 г. меня впервые выбрали в члены-корреспонденты АН СССР, но результат был аннулирован, поскольку меня выбрали на место, зарезервированное за белорусским академиком-партизаном А. Н. Борисевичем).

В дальнейшем тема спектроскопии шумов интенсивности возродилась в нашей совместной работе с Валерием Сергеевичем Запасским, который предложил зондировать парамагнитную среду с помощью внерезонансного излучения с тем, чтобы искать в спектре шумов фарадеевского вращения характеристики парамагнетика – гиромагнитное отношение и релаксационные константы. По существу речь шла о новой версии техники парамагнитного резонанса с революционным отличием отсутствия индуцирующего резонанс переменного поля. (Её можно было бы назвать техникой спонтанного магнитного резонанса). И действительно, нам удалось с высокой надёжностью обнаружить характерный резонанс в спектре шумов фарадеевского вращения лазерного излучения в парах натрия: «Магнитный резонанс в спектре шумов фарадеевского вращения.» *ЖЭТФ, т.81, №1(7), 132-138, 1981*. В отличие от темы квантовых биений (которая была вполне в тренде веяний эпохи), тема спектроскопии шумов на десятилетия обогнала своё время и была практически не замечена научной общественностью. И лишь в последнее десятилетие она стала интенсивно развиваться. Но это уже тема другой лекции, которую должен читать В. С. Запасский.