

БИЕНИЯ В ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ КОГЕРЕНТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Е. Б. Александров

В этой статье описан наиболее прямой эксперимент по демонстрации свободных биений, возникающих в результате интерференции двух энергетически различных состояний атома, возбужденного коротким световым импульсом. Вопрос о биениях при квантовых переходах достаточно подробно рассмотрен в недавних работах [1-8], поэтому ниже дается лишь качественное пояснение сущности наблюдавшегося явления.

Рассмотрим для простоты атом, обладающий вырожденным основным состоянием и двумя уровнями (1 и 2) в возбужденном состоянии, связанными электрическими дипольными переходами с общим основным состоянием. При этих условиях атом может быть возбужден светом определенной поляризации с достаточно широким спектром в состоянии, характеризуемое суперпозицией двух рассматриваемых состояний 1 и 2 с определенной энергией, т. е. в результате возбуждения атом в некотором смысле находится на двух уровнях сразу. Вследствие этого можно ожидать появления в спектре спонтанного излучения атома двух оптических гармоник, которые, интерферируя, дадут биения интенсивности с частотой перехода между состояниями 1 и 2, участвующими в суперпозиции.¹ Действительно, при полуклассическом рассмотрении процесса излучения [1, 3-7] атома, возбужденного в момент времени $t=0$, оказывается, что вероятность $W(t)$ излучения фотона с определенной поляризацией испытывает биения во времени и описывается формулой

$$W(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} [A + B \cos(\Omega t + \varphi)]. \quad (1)$$

Здесь τ — время жизни атома в состоянии с определенной энергией, предполагаемое одинаковым для уровней 1 и 2; A , B и φ — константы, определяемые направлением и поляризацией возбуждающего света и света люминесценции, $\Omega = \frac{E_2 - E_1}{h}$, E_2 и E_1 — собственные энергии состояний 1 и 2. Таким образом, в отличие от обычного экспоненциального распада возбужденного состояния должно иметь место затухающий колебательный процесс. Для обнаружения этого явления достаточно наблюдать кинетику люминесценции ансамбля атомов, возбужденных световым импульсом, коротким по сравнению с периодом биений. Такой опыт предлагался разными авторами, однако до сих пор не был осуществлен из-за экспериментальных трудностей, связанных в основном с необходимостью создания за короткое время достаточного числа возбужденных атомов, что в конечном счете лимитируется яркостью источника света. В данной работе эти трудности преодолены применением метода накопления при регистрации сигнала.

Объект исследования и экспериментальная установка. В качестве объекта эксперимента был выбран кадмий. Использовался интеркомбинационный переход $5^3P_1 - 5^1S_0$ (3261 \AA), $\tau = 2.4 \cdot 10^{-6}$ сек. Терм 5^3P_1 в магнитном поле распадается на простой зеемановский триплет. Роль уровней 1 и 2 играли крайние компоненты триплета ($m = \pm 1$), которые могут когерентно возбуждаться светом с электрическим вектором, нормальным к магнитному полю. Схема эксперимента была следующей [5]. Насыщенные при 230° пары кадмия возбужда-

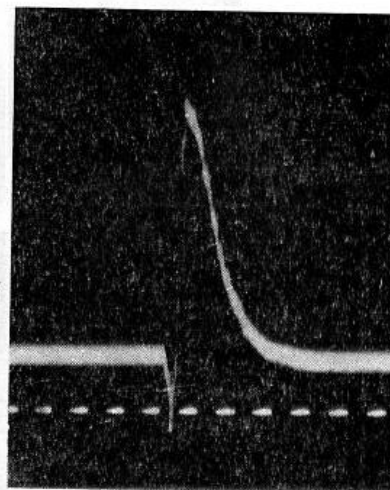


Рис. 1. Осциллограмма возбуждающего светового импульса.

Метки времени через 0,2 мксек. «Отрицательный» выброс у переднего фронта обусловлен наводкой от модулятора.

¹ То, что обе гармоники излучаются одним атомом в элементарном акте, позволяет наблюдать биения на низких частотах, несмотря на превосходящий (обычно в тысячи раз) доплеровский разброс частот излучения отдельных атомов. Это обстоятельство, в частности, отличает эксперименты по биениям от опытов Форрестра [9] гетеродинамирования света.

лись плоскополяризованным светом кадмиевой лампы, прошедшим через импульсный модулятор. Люминесценция регистрировалась под прямым углом к полю и электрическому вектору возбуждающего света с помощью ФЭУ, сигнал с которого усиливался и подавался на осциллограф.

Как легко показать [3, 7] в формуле (1) $A = B$, т. е. глубина искомой модуляции экспоненты может достигать 100%, а начальная фаза колебательного процесса равна нулю.

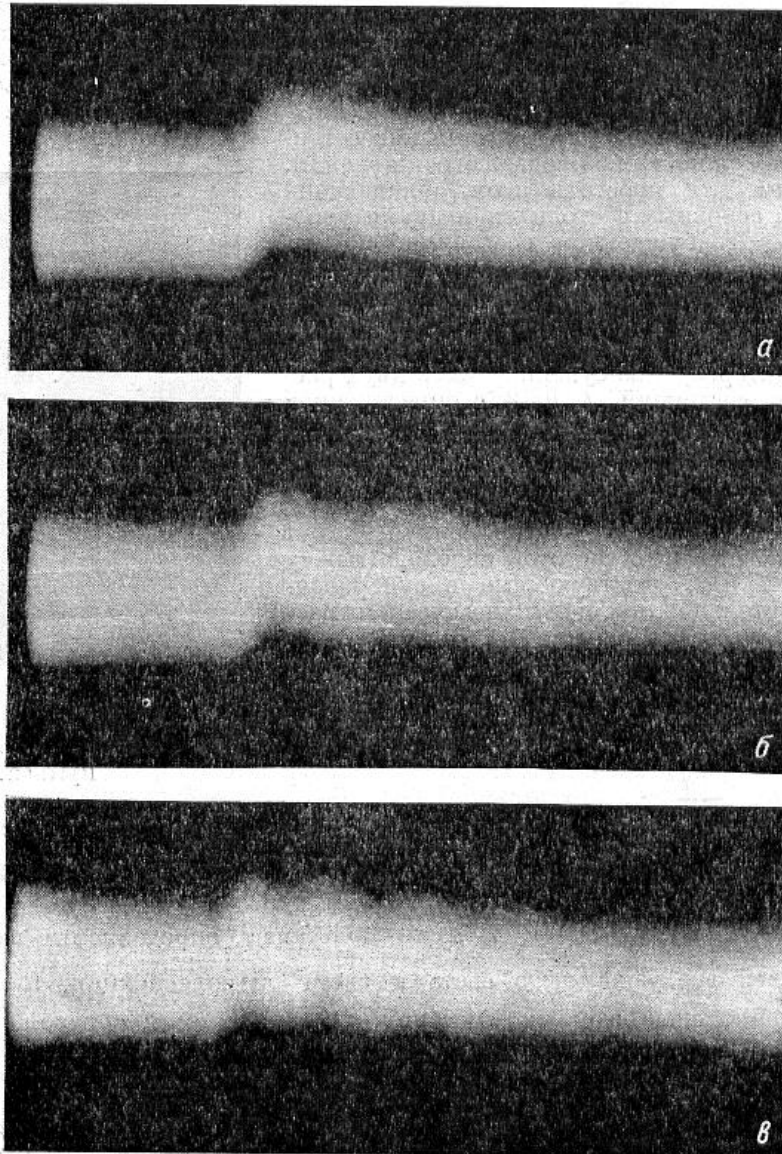


Рис. 2. Снимки с экрана осциллографа, полученные путем экспонирования одного кадра сериями по $2 \cdot 10^{-4}$ осциллограмм одиночных импульсов.

а — магнитное поле равно 0; б — биения в земном поле (0.152 Гс);
в — биения в удвоенном поле (0.304 Гс).

Основным элементом установки служил импульсный модулятор света, использующий электрооптический эффект в кристалле дигидрофосфата аммония [10]. Был применен тонкий (1.5 мм) кристалл диаметром 35 мм. Полное пропускание открытого модулятора для осевого пучка было около 10%. Закрытый модулятор пропускал 30% света. Модулятор полностью открывался при приложении напряжения 5.2 кв. Для формирования коротких световых импульсов на модулятор, шунтированный сопротивлением 120 ом, через импульсный тиратрон разряжалась емкость 2000 пф. Стартовые импульсы, поджигавшие тиратрон, с некоторым опережением запускали развертку осциллографа. На рис. 1 приведена осциллограмма возбуждающего светового импульса. Метки времени следуют через 0.2 мксек.

В целях борьбы с шумами, а также для подавления электрических наводок от модулятора полоса усилителя была ограничена диапазоном 30 кгц—3 мгц (на уровне 0.7).

Метод накопления. По измерениям фототока за один импульс люминесценции катод ФЭУ эмиттировал около 100 фотоэлектронов, что в заданной полосе частот соответствовало максимальному (в начале осциллограммы) отношению S сигнала к шуму, лишь несколько большему единицы. Дополнительное уменьшение S (примерно в 2 раза) вызвано относительно большой постоянной засветкой ФЭУ из-за неполного закрытия модулятора. Более того, фактически сигналом является модуляция люминесценции, глубина которой уменьшается в 2—3 раза, по сравнению с теоретическим значением 100%, за счет ряда факторов: вследствие конечности времени возбуждающего импульса, из-за присутствия в парах кадмия нечетных изотопов с другими частотами биений [2, 6] и в результате остаточного возбуждения уровня $m=0$.

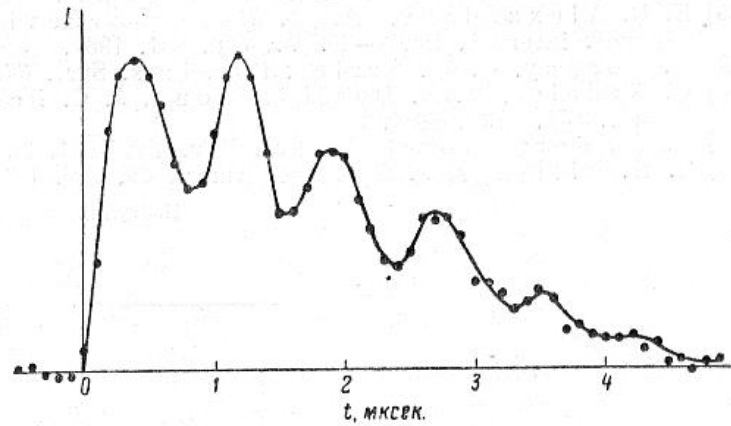


Рис. 3. Результат фотометрической обработки негатива рис. 2, в.

Таким образом, ожидался сигнал с отношением к шуму, существенно меньшим единицы, так что прямое наблюдение осциллограммы не оставляло надежды на обнаружение биений. Поэтому был применен метод фотографического накопления сигнала. С этой целью сигнал с экрана осциллографа фотографировался многократно на один кадр. Модулятор запускался в стробоскопический режим с частотой повторения импульсов 50 гц. Экспонирование фотоэмульсии проводилось в течение 7 мин., так что на одном кадре фиксировалось 20 тысяч импульсов. Полученный негатив подвергался фотометрической обработке. Такой прием позволил более чем в 100 раз увеличить отношение сигнала к шуму.

Результат эксперимента. Во время опыта вертикальная составляющая земного магнитного поля компенсировалась кольцами Гельмгольца. Горизонтальная составляющая (0.152 гс) в одних опытах компенсировалась (для получения контрольных результатов), в других — сохранялась или удваивалась.

На рис. 2 приведены фотокопии трех негативов, полученных описанным путем. Рис. 2, а соответствует отсутствию биений — уровни 1 и 2 вырождены в нулевом поле. Сплошная полоса на снимке является результатом усреднения шумовых выбросов. На снимке достаточно четко виден быстрый подъем и медленный спад люминесценции.

Снимки рис. 2, б и в сделаны соответственно в земном магнитном поле и в удвоенном. Хорошо видны возникающие биения, и можно видеть, что их частоты отличаются примерно в 2 раза.

На рис. 3 представлен результат фотометрической обработки последнего негатива. Точки, приведенные на графике, соответствуют средней из четырех кривых равных плотностей негатива, снятых на разных уровнях. Приведенный на рис. 3 масштаб времени позволяет оценить частоту биений для сравнения с теоретическим значением. Длительность периода составляет 0.7—0.8 мксек., что хорошо согласуется с теоретической длительностью 0.78 мксек., найденной по формуле

$$T = (2\mu g H)^{-1},$$

где H — напряженность поля, μ — магнетон Бора, g — фактор Ланде, равный 2; $2\mu g = 4.2 \cdot 10^6 \text{ сек.}^{-1} \cdot \text{гс}^{-1}$.

Следует заметить, что заметно меньшая величина первого периода (которая, напротив, должна быть несколько длиннее других), так же как и относительно малая амплитуда первого пика, связаны с частотными искажениями усилителя, ограниченная полоса которого не позволила передать начального броска интенсивности.

В заключение автор выражает глубокую благодарность А. М. Болч-Бруевичу за поддержку и внимание к работе.

Литература

- [1] М. И. Подгорецкий. Препринт ОИЯИ, Р—491, 1960.
- [2] Е. Б. Александров. *Опт. и спектр.*, *14*, 436, 1963; *16*, 377, 1964.
- [3] О. В. Константинов, В. И. Перель. *ЖЭТФ*, *45*, 503, 1963; *Electron. quant. C-r. 3 conf. internat. Paris.* — N. Y., стр. 159, 1964.
- [4] М. И. Подгорецкий, О. А. Хрусталева. *Усп. физ. наук*, *81*, 217, 1963.
- [5] Е. Б. Александров, В. П. Козлов. *Опт. и спектр.*, *16*, 533, 1068, 1964.
- [6] E. B. Alexandrov, A. M. Bonch-Bruевичh. *Electron. quant. C-r. 3 conf. internat. Paris—N. Y.*, стр. 301, 1964.
- [7] A. Gorney, G. W. Series. *Proc. Phys. Soc.*, *83*, 208, 213, 1964.
- [8] O. Nedelec, M. N. Deschireaux, J. C. Pebay-Peyroula. *Compt. rend.*, *257*, 3130, 1964.
- [9] A. Th. Forrester et al. *Phys. Rev.*, *99*, 1691, 1955.
- [10] C. H. Billings. *J. Opt. Soc. Amer.*, *39*, 797, 1949.

Поступило в Редакцию 10 августа 1964 г.