

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра теоретической физики

**«Разработка учебных компьютерных моделей по нелинейной
оптике и лазерной спектроскопии»**

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
МАГИСТРА

студента 2 курса 251 группы
направления 03.04.02 «Физика»
физического факультета

Дворцовой Анастасии Владимировны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор _____

В.Л. Дербов

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор _____

Л.М. Бабков

г. Саратов – 2017

1. Введение. Современные тенденции физического образования характеризуются сокращением объема лекционных занятий и повышением роли практических занятий и самостоятельной работы студентов. Одновременно с этим в учебных планах бакалавров-физиков значительную роль начинают играть специальные курсы по выбору, читаемые одновременно с фундаментальными дисциплинами, которые нужны для их глубокого усвоения. В частности, сюда относятся учебные дисциплины, связанные с проблемами взаимодействия света с веществом, для детального понимания которых требуется основательное знание оптики и квантовой механики. В качестве примера можно привести дисциплину по выбору «Основы квантовой теории взаимодействия света с веществом» для студентов бакалавриата СГУ 3 курса, которые одновременно проходят общий курс квантовой теории. При подготовке лекций, разработке практических заданий и заданий для самостоятельной работы возникают методические трудности, связанные с тем, что имеющаяся учебно-методическая литература, как правило, рассчитана на более высокий уровень общей подготовки по физике и математике. Написанные достаточно давно, классические учебники по взаимодействию излучения с веществом содержат большой объем аналитических приближенных расчетов и непропорционально малый объем иллюстративного материала. Подчеркнем, что речь идет об известных явлениях, хорошо изученных теоретически и экспериментально и подробно описанных в научной и учебной литературе, так что указанная проблема носит не научный, а методический характер: подробная теория указанных эффектов сравнительно сложна, а объем отведенных часов и подготовленность слушателей ограничены. Для ускоренного ознакомления студентов с физикой подобных явлений одним из возможных вариантов представляется ограничить изложение теории выводом основных уравнений, после чего путем численного моделирования иллюстрировать целый ряд эффектов, описываемых ими. Достоинством

такого подхода является сокращение объема аналитических расчетов, вызывающих у студентов младших курсов затруднения, а то и просто недоступных в силу того, что они еще не прошли соответствующих фундаментальных дисциплин, наглядность графически представленных результатов, а главное - интерактивный режим работы, поскольку студент может самостоятельно менять параметры модели и вносить в нее изменения по своей инициативе, иногда с помощью преподавателя, и таким образом не пассивно усваивать готовую информацию, а активно участвовать в ее получении. При этом реализация модели в средах современных пакетов для символьно-численных вычислений, например, Mathematica, делает программный продукт простым по структуре и доступным для пользователя при минимальном объеме исходных инструкций. Предложенные в настоящей работе простые модели иллюстрируют положения известных учебников, они могут применяться на лекциях как наглядные демонстрации, а на практических занятиях - как работы компьютерного практикума, в котором могут ставиться как простые задания, так и более сложные задачи поискового плана.

В настоящей работе в качестве конкретного объекта описания рассмотрена двухуровневая модель атома – простейшая и хорошо изученная модель взаимодействия атомных систем с электромагнитными полями, использованная в множестве оригинальных статей и давно вошедшая в учебную литературу. В учебно-методических целях двухуровневая модель широко используется как простой и наглядный пример. Тем не менее, именно в учебной литературе остаются вопросы, требующие критического анализа.

Во-первых, хорошо известно, что для корректного описания диссипативных процессов в атомах, приводящих к релаксации и формирующих частотный спектр, требуется описывать атом с помощью матрицы плотности. Тем не менее, часто используется аппарат квантовых уравнений для амплитуд вероятности (уравнение Шредингера в базисе

собственных состояний атомного гамильтониана). Введение феноменологических констант затухания (времен жизни состояний) в такой картине не позволяет описать переход системы в состояние теплового равновесия. Если для перехода между возбужденными состояниями (типичная модель рабочего перехода в активной среде лазера) такое приближение еще работает, то для перехода из основного состояния в возбужденное получаются неправильные результаты. Вопрос не стоил бы обсуждения, если бы указанная ошибка не встречалась в новых и авторитетных учебных изданиях. Так, например, ошибки, допущенные в связи с феноменологическим введением констант затухания в уравнение Шредингера в такой авторитетной книге, как недавно переизданная и известная во всем мире книга Демтредера [Демтрёдер В. Современная лазерная спектроскопия. М.: Интеллект, 2014].

Во-вторых, поскольку для описания разных режимов, как правило, требуются разные приближения, в большинстве учебников отсутствует единое описание переходных и установившихся режимов при включении монохроматического внешнего поля, а также реакции двухуровневой системы на импульсное либо периодически модулированное излучение различной формы. Это не позволяет себе единым образом представить картину взаимодействия двухуровневого атома с электромагнитным полем и увидеть, как происходит переход от одного режима к другому.

В-третьих, широко фундаментальные приближения, например, приближение вращающейся волны, в большинстве учебников используются без количественных иллюстраций, что не способствует правильному усвоению данного материала студентами.

В связи со сказанным, представляется актуальным провести моделирование основных эффектов резонансного взаимодействия стационарного, импульсного и периодически моделированного излучения с квантовой двухуровневой системой. Рассмотрение ведется на основании формализма матрицы плотности, приводящего к уравнениям Блоха. С целью

определения основных величин и лучшего понимания материала вначале приводится известный из литературы вывод основных уравнений, включая приближение медленных огибающих, а также расчет коэффициентов поглощения и преломления на их основе. Далее приводятся и анализируются примеры эффектов, возникающих при внезапном включении стационарного излучения, импульсов различной формы и модулированного внешнего излучения. Численная демонстрация установления стационарного режима и анализ условий проявления осцилляций Раби. Результаты предназначены для использования в учебном процессе и уже апробированы в качестве лекционных демонстраций.

2. Описание релаксирующей двухуровневой системы во внешнем электромагнитном поле с помощью матрицы плотности. Раздел начинается с изложения феноменологической теории релаксации, основанной на введении двух типов релаксации - продольной (релаксация заселенностей) и поперечной (релаксация когерентностей) в объеме, необходимом для понимания последующего материала. В результате получены уравнения для матрицы плотности квантовой системы с феноменологическими релаксационными членами. Далее излагаются основы полуклассической теории взаимодействия атома с полем, в которой атом описывается уравнениями для матрицы плотности как диссипативная квантовая система, а поле является классической функцией времени. Конкретизация уравнений для матрицы плотности проводится для двухуровневой модели атома, что приводит к известным уравнениям Блоха

$$i\hbar\dot{\rho}_{ba} = \hbar \omega_{ba} - i\gamma_{ba} \rho_{ba} + V_{ba} e^{-i\omega t} \Delta_{ab};$$

$$\dot{\Delta}_{ab} = \frac{4}{\hbar} \text{Im}[V_{ab} e^{i\omega t} \rho_{ba}] + \frac{\Delta_{ab}^0 - \Delta_{ab}}{T_1}.$$

Здесь Δ_{ab} - разность заселенностей, Δ_{ab}^0 - ее значение в состоянии теплового равновесия, ρ_{ba} - когерентность (недиагональный элемент матрицы плотности, аналогична продольной), ω_{ba} - частота перехода, γ_{ba} - скорость

поперечной релаксации, $V_{ba}(t)$ - зависящий от времени матричный элемент дипольного взаимодействия атома с электрическим полем световой волны, T_1 - время продольной релаксации. В монохроматическом

поле $V_{ba}(t) = -\hbar\Omega_{ba} \cos \omega t = -\frac{\hbar\Omega_{ba}}{2} (e^{-i\omega t} + e^{i\omega t})$. Величина

$\Omega_{ba} = \frac{1}{\hbar} \mathbf{D}_{ba} \cdot \mathbf{e} E_0$, называется частотой Раби, \mathbf{D}_{ba} - матричный элемент дипольного момента перехода, E_0 - скалярная амплитуда электрического поля.

3. Динамика релаксирующей двухуровневой системы в монохроматическом поле.

Раздел начинается с прямого численного решения уравнений Блоха без дополнительных приближений. Построенная математическая модель позволяет проводить численные эксперименты по изучению динамики системы путем прямого численного решения уравнений Блоха с соответствующими начальными условиями. Результат показывает, что даже при довольно невыгодных условиях $\omega_{ba}=110$; $\omega=100$; $\gamma_{ba}=0.6$; $T_1=0.5$; $\Omega_{ab}=20$ когда частотная отстройка всего лишь в 10 раз меньше самих частот, разность заселенностей испытывает заметные осцилляции Раби плюс высокочастотное «дрожание» и постепенно выходит на высокочастотные колебания вблизи значения 0.5 (рис.1). Действительная часть когерентности за время порядка времени релаксации выходит на режим стационарных вынужденных колебаний на частоте монохроматического поля накачки. Временное изменение мнимой части происходит аналогично с точностью до фазового сдвига.

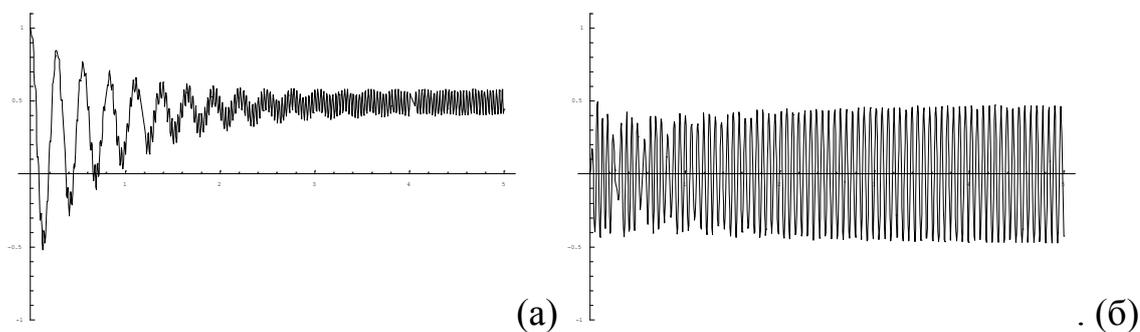


Рис. 1. Разность заселенностей (а) и действительная часть когерентности (б) как функции времени для медленно релаксирующей системы в сильном поле с большой отстройкой от резонанса.

Такое поведение говорит о разумности используемого в литературе резонансного приближения даже в сравнительно невыгодных для него условиях. При точном резонансе и более слабом поле резонансное приближение выполняется еще лучше, то есть высокочастотные осцилляции с графической точностью исчезают. При составлении заданий для работы студентов можно специально поставить задачу проследить за увеличением частоты осцилляций Раби с ростом расстройки частоты при фиксированной амплитуде поля и сравнить теорию с численным экспериментом

Проведенные расчеты, частные примеры которых показаны выше, позволяют проследить, как осцилляции Раби переходят в режим насыщения. Рассмотрим одну и ту же среду в монохроматическом поле, частоту и амплитуду которого можно менять. Осцилляции Раби будут хорошо выражены при условии, что $2\pi / \Omega \ll T_1, T_2$, то есть за времена релаксации успеет произойти достаточное количество колебаний. При его невыполнении вместо осцилляций Раби наблюдается переходный процесс (в пограничном режиме немонотонный) к режиму стационарного насыщения. Изложенные соображения достаточно просты, здесь, как и в других частях нашей работы методическая цель заключается в наглядной иллюстрации перехода от одного режима к другому. Именно этой наглядности, как нам представляется, не хватает в классических учебниках, где оба режима рассматриваются

отдельно, а при попытке объединения в упомянутой выше книге Демтрёдера допущены ошибки.

Поскольку проведенные оценки указывают на применимость приближения медленных огибающих, именно оно используется далее. Для иллюстрации резонансного приближения рассмотрены примеры, близкие к примерам предыдущего раздела, чтобы можно было провести сравнение результатов. Из последних видно, что по истечении времен релаксации разность населенностей и амплитуда когерентности выходят на стационарные значения (эффект насыщения), когда затухание осцилляций Раби уже произошло. В установившемся режиме уравнения для медленных огибающих имеют простые аналитические решения. Эти решения совпадают с асимптотикой численных зависимостей, приведенных выше. В следующем подразделе изложена и проиллюстрирована численными примерами теория линейного и нелинейного поглощения и дисперсии света системой двухуровневых атомов. Раздел завершается численным исследованием возбуждения двухуровневой системы импульсами различной формы.

4. Заключение. Решены следующие актуальные методические задачи, составляющие содержание настоящей работы:

- Сжатое систематическое изложение теории взаимодействия двухуровневого атома с внешним электромагнитным полем на базе матрицы плотности. Численная демонстрация процесса установления стационарного режима и анализ условий проявления осцилляций Раби.
- Сжатое изложение теории дисперсии в линейном и нелинейном случае, демонстрация явления оптической нутации. Численная демонстрация применимости приближения вращающегося поля
- Сжатое изложение приближения медленных огибающих и его использование для описания импульсных воздействий различного вида с демонстрацией явления распада свободной индукции, а также пи-импульсов различной формы.

Настоящая работа имеет учебно-методическую направленность, и ее результаты планируется использовать в учебном процессе при преподавании дисциплины по выбору «Основы квантовой теории взаимодействия света с веществом» для студентов бакалавриата СГУ 3 курса.