

УДК 535.2:539.184

А.В.Глушков, д.ф.-м.н.

Одесский государственный экологический университет

КЭД ТЕХНИКА МОМЕНТОВ И S-МАТРИЧНЫЙ ФОРМАЛИЗМ ГЕЛЛ –МАНА И ЛОУ В ЗАДАЧЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ С ИЗЛУЧЕНИЕМ

На основе квантово- электродинамической теории (КЭД) моментов и S-матричного формализма Гелл –Мана и Лоу выполнено численное моделирование характеристик радиационных линий многофотонного поглощения (сдвиг, ширина) для атомных систем в поле многомодового импульса лазерного излучения гауссовой и солитон-подобной форм.

Ключевые слова: *квантово-электродинамическая теория моментов, радиационные атомные линии*

Введение. В настоящее время резко возрос интерес к численному моделированию динамики атомных и других систем в интенсивных внешних полях лазерного излучения [1-13], в частности, к моделированию эффектов многофотонной ионизации, многофотонного возбуждения, поглощения, расчету характеристик многофотонных резонансов в атомах, молекулах, многофотонных оптических эффектов в атомарных средах. В классической работе Lompre L-A., Mainfray G. и др. [4] (Французский Центр ядерных исследований) была экспериментально исследована статистика лазерного излучения и измерены характеристики мультифотонной ионизации атома цезия на длине волны 1059 нм. Одной из важнейших проблем теории остается количественная оценка влияния формы импульса лазерного излучения (ЛИ) на характеристики радиационных атомных линий многофотонного поглощения (излучения). Взаимодействие атомной системы с одномодовым (лоренцов импульс) ЛИ теоретически и экспериментально рассматривалось в [3,4,10,11,14], а с многомодовым (гауссов импульс) ЛИ- напр., в [3,4,14]. В настоящей работе на основе КЭД техники моментов и S-матричного формализма Гелл –Мана и Лоу (см. [10-14]) выполнено численное моделирование характеристик радиационных линий многофотонного поглощения (динамический сдвиг и ширина многофотонных резонансов) для атомных систем, взаимодействующих с полем многомодового импульса ЛИ гауссовой и солитон-подобной форм.

Квантово- электродинамическая теория моментов. Опишем процедуру расчета характеристик многофотонных резонансов для атомных систем, взаимодействующих с полем ЛИ. В настоящее время имеется обширная литература [1-3] и развиты методы, корректно описывающие взаимодействие с полем гармонического излучения. При описании взаимодействия с реальным ЛИ большинство из них, особенно в случае сильного поля, дают некорректные результаты [10,14]. Будем описывать взаимодействие квантовой системы с полем ЛИ потенциалом Иванова [10]:

$$V(r,t) = V(r) \int d\omega f(\omega - \omega_0) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos [\omega_0 t + \omega_0 n \tau], \quad (1)$$

где n -целое число, $f(\omega)$ - фурье - образ лазерного импульса, τ - интервал следования импульсов. Далее мы рассмотрим взаимодействие многоэлектронного атома с одиночными импульсами ЛИ гауссовой формы и солитон-подобной формы. В последнем случае форма импульса описывается стандартной функцией $f(t)$ вида:

$$f(t) = N ch^{-1} [t/D]. \quad (2)$$

Пользуясь КЭД техникой моментов [10,11,14] для произвольного уровня α системы, вычисляется мнимая часть энергетического сдвига δE как функция центральной частоты лазерного импульса ω_0 . Искомая функция имеет вид резонансной кривой. Каждый резонанс связывается с конкретным переходом “ α - p ”, в котором поглощается “ k ” число фотонов (α, n -дискретные уровни в спектре атома). Для искомого резонанса вычисляются моменты радиационных линий:

$$\begin{aligned} \delta\omega(p\alpha|k) &= \int' d\omega \operatorname{Im} E_\alpha(\omega) (\omega - \omega_{p\alpha}/k) / N, \\ \mu_m &= \int' d\omega \operatorname{Im} E_\alpha(\omega) (\omega - \omega_{p\alpha}/k)^m / N, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\int' d\omega \operatorname{Im} E_\alpha$ - нормировочный множитель; $\omega_{p\alpha}$ - положение несмещенной линии перехода α - p ; $\delta\omega(p\alpha|k)$ -сдвиг линии при k -фотонном поглощении; $\omega_{p\alpha} = \omega_{p\alpha} + k \cdot \delta\omega(p\alpha|k)$.

Моменты μ_1, μ_2 и μ_3 определяют соответственно сдвиг радиационной линии, ее дисперсию и асимметрию. Для расчета μ_m необходимо провести разложение E_α в ряд теории возмущений [11]: $E_\alpha = \sum E_\alpha^{(2k)}(\omega_0)$. С учетом этого:

$$\begin{aligned} \delta\omega(p\alpha|k) &= \int' d\omega \operatorname{Im} E_\alpha^{(2k+2)}(\omega) (\omega - \omega_{p\alpha}/k) / N^{(2k)}, \\ \mu_n &= \int' d\omega \operatorname{Im} E_\alpha^{(2k)}(\omega) (\omega - \omega_{p\alpha}/k)^n / N^{(2k)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для получения искомого разложения используется адиабатическая формула Гелл-Мана и Лоу для энергетического сдвига ΔE_α , выражаемого через электродинамическую матрицу рассеяния [11]. В результате представление S - матрицы в виде ряда теории возмущений индуцирует разложение для ΔE_α :

$$\begin{aligned} \Delta E_\alpha(\omega_0) &= i \lim_{\gamma \rightarrow 0} \gamma \sum_{k_1 k_2 \dots k_n} a(k_1, k_2, \dots, k_n) I_\gamma(k_1, k_2, \dots, k_n), \\ I_\gamma(k_1, k_2, \dots, k_n) &= \prod_{j=1}^n S_\gamma^{(k_j)}, \\ S_\gamma^{(m)} &= (-1)^m \int_{-\infty}^0 dt_1 \dots \int_{-\infty}^{t_m-1} dt_m \langle \Phi_\alpha | V_1 V_2 \dots V_m | \Phi_\alpha \rangle, \\ V_j &= \exp(1H_0 t_j) V(rt_j) \exp(-1H_0 t_j) \exp(\gamma t_j), \end{aligned} \quad (5)$$

где H - гамильтониан квантовой системы; $a(k_1, k_2, \dots, k_n)$ - численные коэффициенты. С учетом вклада процесса k - фотонного поглощения в двух первых порядках теории возмущений окончательные выражения для сдвига и моментов радиационных линий многофотонного поглощения можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \delta\omega(p\alpha | k) &= \{\pi\alpha / k (k + 1)\} [E(p, \omega_{p\alpha}/k) - E(\alpha, \omega_{p\alpha}/k)], \\ \mu_2 &= \alpha^2 / k \\ \mu_3 &= \{4\pi\alpha^3 / [k (k + 1)]\} [E(p, \omega_{p\alpha}/k) - E(\alpha, \omega_{p\alpha}/k)], \end{aligned} \quad (6)$$

$$E(j, \omega_{p\alpha}/k) = 0,5 \sum_{p_i} V_{jpi} V_{pij} \left[\frac{1}{\omega_{jpi} + \omega_{p\alpha} / k} + \frac{1}{\omega_{jpi} - \omega_{p\alpha} / k} \right], \quad (7)$$

где α - численный коэффициент, зависящий от формы импульса [10,14] В (7), как обычно, суммирование проводится по всем состояниям атомной системы. Формулы (6,7) описывают радиационную линию многофотонного поглощения вблизи резонансной частоты $\omega_{p\alpha}/k$ при взаимодействии атомной системы с импульсом ЛИ. В конкретных численных расчетах принципиальную роль играет качество вычисления, полнота базиса атомных состояний и корректное определение (7). Для этих целей эффективным оказалось использование последовательной КЭД процедуры генерирования базиса собственных функций гамильтониана Дирака и эффективного расчета сумм (7) в членах высших порядках КЭД теории возмущений [11].

Результаты расчета и выводы. Ниже приводятся результаты изучения характеристик радиационных линий многофотонного поглощения (сдвиг, ширина) для атома в поле многомодового импульса лазерного излучения гауссовой и солитон-подобной форм на примере трехфотонного перехода 6S-6F в атоме цезия на длине волны 1059 нм. В работе [4] экспериментально исследована статистика ЛИ и измерены характеристики мультифотонной ионизации атома цезия при взаимодействии с импульсом лоренцевой и гауссовой форм. Согласно [4], динамический сдвиг линии многофотонного резонанса является линейной функцией интенсивности ЛИ (интенсивность ЛИ изменялась в пределах от значения $1,4 \cdot 10^7$ Вт/см² до $1,0 \cdot 10^8$ Вт/см²). Для импульса гауссовой формы экспериментальный результат: $\delta\omega(p\alpha|k) = bI$, где I – интенсивность ЛИ, коэффициент $b = (5,6 \pm 0,3)$ см⁻¹/ГВт·см⁻² (коэффициент определен в единицах энергии трех фотонного перехода 6S-6F). Сдвиг линии, полученный при взаимодействии атомам Cs с лоренцовым (одно модовым) импульсом ЛИ: $\delta\omega_0(p\alpha|k) = aI$, где $a = 2$ см⁻¹/ГВт·см⁻² [4]. Наш расчет дал следующие теоретические значения для сдвига резонанса. Для случая гауссовой формы импульса ЛИ получено:

$$\delta\omega(p\alpha|k) = bI, \quad b = 5,65 \text{ см}^{-1}/\text{ГВт}\cdot\text{см}^{-2};$$

Для сравнения приведем также наши расчетные данные для случая лоренцевой формы импульса ЛИ [10]:

$$\delta\omega_0(p\alpha|k) = aI, \quad a = 2,03 \text{ см}^{-1}/\text{ГВт}\cdot\text{см}^{-2};$$

Для случая солитон-подобной формы (2) импульса ЛИ (многомодовый импульс) для сдвига резонанса нами получено:

$$\delta\omega(p\alpha|k) = bI, \quad b = 6,67 \text{ см}^{-1}/\text{ГВт}\cdot\text{см}^{-2}.$$

На рис.1 приведены результаты нашего расчета ширины многофотонного резонанса на переходе 6S-6F в атоме Cs (длина волны 1059нм) в зависимости от интенсивности ЛИ. Используются обозначения: линия S- для одномодового лоренцова импульса; M₁, M₃, M₄- для многомодового гауссова импульса с шириной линии соответственно 0.03см⁻¹, 0.08см⁻¹ и 0.15 см⁻¹; M₂, M₅- для многомодового солитон-подобного импульса с шириной линии соответственно 0.03 см⁻¹ и 0.15 см⁻¹; * -экспериментальные данные [4]. Экспериментальные данные в [4] приведены для импульса гауссовой формы с шириной линии соответственно 0.03 см⁻¹, 0.08см⁻¹, 0.15см⁻¹ и отлично согласуются с нашими результатами. Видно, что сдвиг и ширина линии многофотонного резонанса при взаимодействия атома с многомодовым импульсом ЛИ больше соответствующих сдвига и ширины резонанса при взаимодействии с одномодовым импульсом. Это полностью согласуется с экспериментальными данными [10] и с теоретической точки

зрения обусловлено действием фотон-корреляционных эффектов и влиянием многомодовости импульса ЛИ [3,10,11,14].

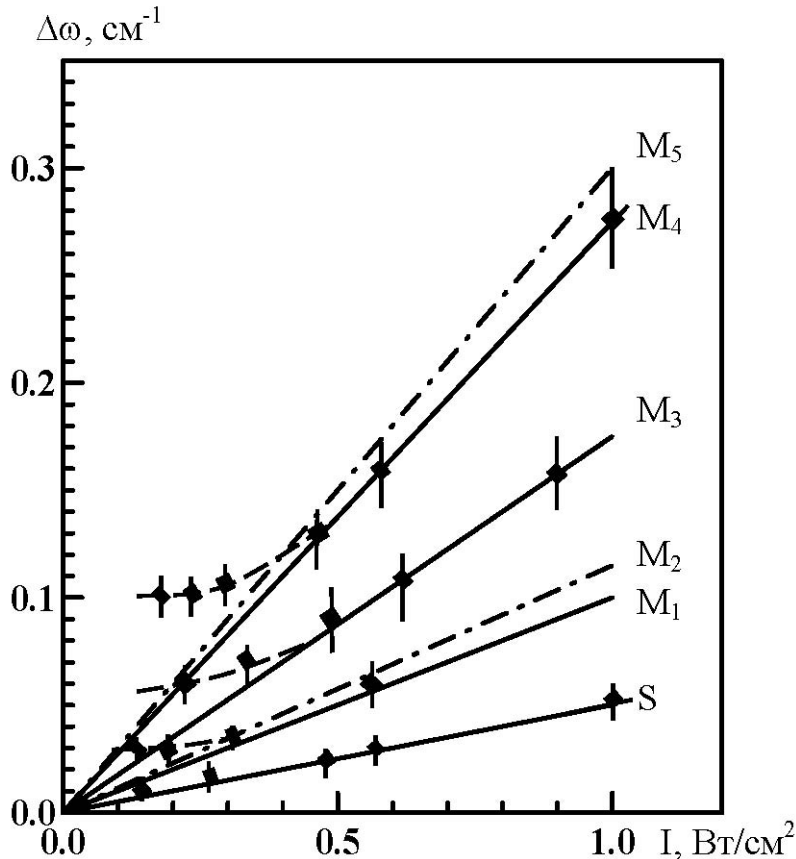


Рисунок 1 - Зависимость ширины $\Delta\omega$ (см⁻¹) резонанса на переходе 6S-6F в атоме Cs (1059 нм) от интенсивности ЛИ I ($\times 10^8$ Вт/см²): S - одномодовый лоренцов импульс [10]; M₁, M₃, M₄- многомодовый гауссов импульс с шириной линии соответственно 0.03 см⁻¹, 0.08 см⁻¹ и 0.15 см⁻¹ (наш расчет); M₂, M₅- многомодовый солитон-подобный импульс с шириной линии соответственно 0.03 см⁻¹, 0.15 см⁻¹ (наш расчет);

✦ - экспериментальные данные [4].

Список литературы

1. Делоне Н.Б., Крайнов В.П., Атом в сильном световом поле, Москва:Наука, 2004.-280С.
2. Летохов В.С., Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах, Москва: Наука, 2003/.370С.
3. Ullrich C.A., Erhard S., Gross E.K.U., Superintense Laser Atoms Physics, New York : Acad.Press., 2006.-580P.
4. Lompre L-A., Mainfrau G., Manus C., Marinier J.P., Laser Light statistics and band-width effects in resonant multi-photon ionization of caesium atoms 1.059 μm // J.Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.-1981.-Vol.14.-P.4307-4326.
5. Glushkov A.V., Malinovskaya S.V., Co-operative laser nuclear processes: border lines effects// In: New projects and new lines of research in nuclear physics. Eds. G.Fazio and F.Hanappe, Singapore : World Scientific.-2003.-P.242-250.

6. *Glushkov A.V., Malinovskaya S.V., Chernyakova Yu.G., Svinarenko A.A.* Cooperative Laser-Electron-Nuclear Processes: QED Calculation of Electron Satellites Spectra for Multi-Charged Ion in Laser Field// *Int.Journ.Quant.Chem.*-2004.-Vol.99,N5.-P.889-893.
7. *Glushkov A.V., Ambrosov S.V., Loboda A.V., Gurnitskaya E.P.*, Consistent QED approach to calculation of electron-collision excitation cross-sections and strengths: Ne-like ions // *Int. Journ.Quant.Chem.*-2005.-Vol.104, N4 .-P. 562-569.
8. *Glushkov A.V., Malinovskaya S.V., Prepelitsa G.P., Ignatenko V.M.*, Manifestation of the new laser-electron nuclear spectral effects in thermalized plasma: QED theory of cooperative laser-electron- nuclear processes// *J.Phys.CS.*-2005.-Vol.178.-P.199-206
9. *Glushkov A.V., Malinovskaya S.V., Dubrovskaya Yu.V., Vitavetskaya L.A.*, Quantum calculation of cooperative muon-nuclear processes: discharge of metastable nuclei during negative muon capture//*Progress of Theor. Phys. and Chem*-2006.-Vol.175.-P.173-182.
10. *Glushkov A.V., Ivanov L.N.*, Shift and deformation of the radiation emission and absorption atomic lines in laser field. Multi-photon Processes// *Proc. Int. Sem. On Atomic Spectroscopy.* –Moscow-Chernogolovka, 1992.-P.II-4.
11. *Glushkov A.V., Ivanov L.N.* Radiation decay of atomic states: atomic residue and gauge noninvariant contributions//*Phys.Lett.A.* -1992.-V.170,N3.-P.33-37.
12. *Glushkov A.V., Ivanov L.N.* DC Strong Field Stark effect: consistant quantummechanical approach//*J.Phys.B.:A.Mol.Opt.Phys.*-1993.-V.26,N16.-P.L379-396.
13. *Glushkov A.V., Ambrosov S.V., Ignatenko A.V., Korchevsky D.A.*, DC Strong Field Stark Effect for Non-hydrogenic Atoms: Consistent Quantum Mechanical Approach // *Int.Journ.Quant.Chem.*-2004.-Vol.99,N5.-P.936-939
14. *Glushkov A.V., Prepelitsa G.P., Polischuk V.N., Dan'kov S.V., Efimov A.V.*, QED theory of non-linear interaction of the complex atomic systems with laser field. Multi-photon resonances//*J.of Techn.Phys.*-1997.-Vol.38, N2.- P.219-225.

Кед техніка моментів і S-матричний формалізм Гелл –Мана та Лоу в задачі взаємодії квантових систем з випромінюванням. Глушков О.В.

На основі квантовоелектродинамічної теорії моментів та S-матричного формалізму Гелл –Мана і Лоу виконано чисельне моделювання характеристик радіаційних ліній багатofотонного поглинання (зсув, ширина) для атомних систем в полі багатомодового імпульсу лазерного випромінювання гауссової та солітон-подібної форм.

Ключові слова: квантово- електродинамічної теорії моментів, радіаційні лінії.

Qed technique of moments and Gell-Mann and Low S-matrix formalism in calculation of interaction of quantum systems with radiation. A.Glushkov

On the basis of quantum electrodynamical moments theory and S matrix formalism Gell-Mann and Low it is carried out the numeral modelling the characteristics of multi photon absorption radiation lines (shift and width) for atom in a field of multimode laser pulse of the Gauss and soliton-like shape.

Key words: quantum electrodynamical moments theory, radiation lines.