

## Хаотическая динамика и управление ею в замкнутых цепочках ридберговских атомов

А. В. Андреев<sup>1,2,\*</sup>, О. И. Москаленко<sup>1,2,†</sup>, А. А. Короновский<sup>1,2,‡</sup>, А. Е. Храмов<sup>1,2,§</sup><sup>1</sup>Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра физики открытых систем Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

В работе проведено исследование нелинейной динамики и хаоса в цепочке связанных ридберговских атомов, обнаружено наличие хаотической динамики в этой системе. Предложен метод подавления хаоса в подобной системе с помощью внешнего параметрического воздействия.

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Mt

УДК: 539.186.3, 530.181

Ключевые слова: ридберговские атомы, ридберговское состояние, дипольная блокада, хаос, подавление хаоса.

В настоящие дни значительный интерес вызывают задачи управления квантовыми системами с ридберговскими атомами в связи с тем, что подобные задачи имеют тесную связь с проблемой создания квантовых компьютеров [1]. Ридберговские атомы — это водородоподобные атомы, внешний электрон в которых находится в высоковозбужденном состоянии, вплоть до уровней порядка 1000. Данные объекты представляют в настоящее время особый интерес [2], потому что они могут быть использованы в квантовом контроле одного атома другими благодаря ридберговским (высоковозбужденным) состояниям. Волновые функции атомов в основном состоянии не превышают значения 0.1 нм, в то время как в ридберговском состоянии они достигают нескольких нанометров и даже выше. Это позволяет атомам, находящимся достаточно далеко для того, чтобы не взаимодействовать друг с другом, находясь в основном состоянии, сильно взаимодействовать в возбужденных состояниях [3].

Значительный интерес вызывает задача возникновения хаотической динамики в квантовой системе. Эта задача также имеет прикладное значение для решения проблемы квантовых вычислений в массиве атомов, включенных в твердое тело, принимающих ридберговское состояние [4].

Также системы с ридберговскими атомами являются перспективными для хранения и передачи информации. В связи с этим является перспективной задачей анализ методик подавления хаотической динамики в таких системах, т. к. хаос будет разрушать все хранимую или передаваемую через систему информацию.

В данной работе нами было проведено исследование замкнутых цепочек из 2–100 ридберговских атомов и была показана возможность возникновения хаотической динамики в рассматриваемой системе. Также было проведено исследование возможности управления

хаотической динамикой путем параметрического воздействия на систему связанных ридберговских атомов.

Исследуемая система связанных ридберговских атомов описывается следующей системой квазиклассических уравнений [5]:

$$\begin{aligned}
 i\dot{w}_i &= -2\Omega \text{Im}q_i - w_i - 1, \\
 \dot{q}_1 &= i[\Delta - c(w_N + w_2 + 2)]q_1 - \frac{q_1}{2} + i\frac{\Omega}{2}w_1, \\
 \dot{q}_i &= i[\Delta - c(w_{i-1} + w_{i+1} + 2)]q_i - \frac{q_i}{2} + i\frac{\Omega}{2}w_i, \quad (1) \\
 \dot{q}_N &= i[\Delta - c(w_{N-1} + w_1 + 2)]q_N - \frac{q_N}{2} + i\frac{\Omega}{2}w_N, \\
 & i = 2 : (N - 1)
 \end{aligned}$$

где  $\Omega$  — частота Раби, с которой осциллирует населенность возбужденного уровня атомной системы под действием резонансного лазерного излучения;  $\Delta$  — отстройка частоты лазерного излучения от частоты резонансного атомного перехода;  $c$  — ридберговское взаимодействие;  $w_i$  — инверсии, т. е. разности населенностей энергетических уровней атомов;  $q_i$  — недиагональные элементы матрицы плотности атома, которая является аналогом волновой функции и служит для описания состояния квантовомеханической системы;  $N$  — число атомов в цепочке.

Для анализа динамики исследуемых систем использовалось построение бифуркационных диаграмм как зависимостей локальных максимумов от значения управляющих параметров и расчет спектров показателей Ляпунова. На рис. 1 изображены бифуркационная диаграмма и спектр ляпуновских показателей для цепочки из 10 атомов. Из него видно, что в такой системе в зависимости от значений управляющих параметров  $\Omega$  и  $\Delta$  может возникать гиперхаотическая динамика, характеризующаяся четырьмя положительными показателями Ляпунова. Спектры ляпуновских показателей были рассчитаны для разного числа атомов, от 2 до 100. Основываясь на этих данных, была построена зависимость числа положительных ляпуновских показателей от числа атомов в цепочке. Было обнаружено, что при увеличении числа атомов  $N$  в цепочке проис-

\*E-mail: andreevandv@gmail.com

†E-mail: o.i.moskalenko@gmail.com

‡E-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

§E-mail: hramovae@gmail.com

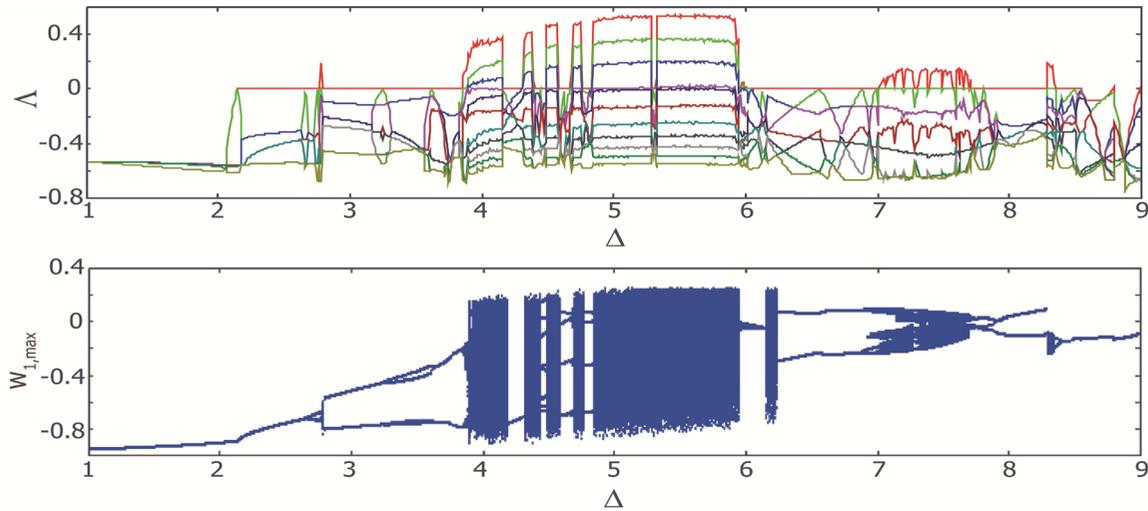


Рис. 1: Спектр показателей Ляпунова (вверху) и бифуркационная диаграмма (внизу) для замкнутой цепочки из 10 связанных ридберговских атомов при значении управляющих параметров  $c = 5$ ,  $\Omega = 2.5$

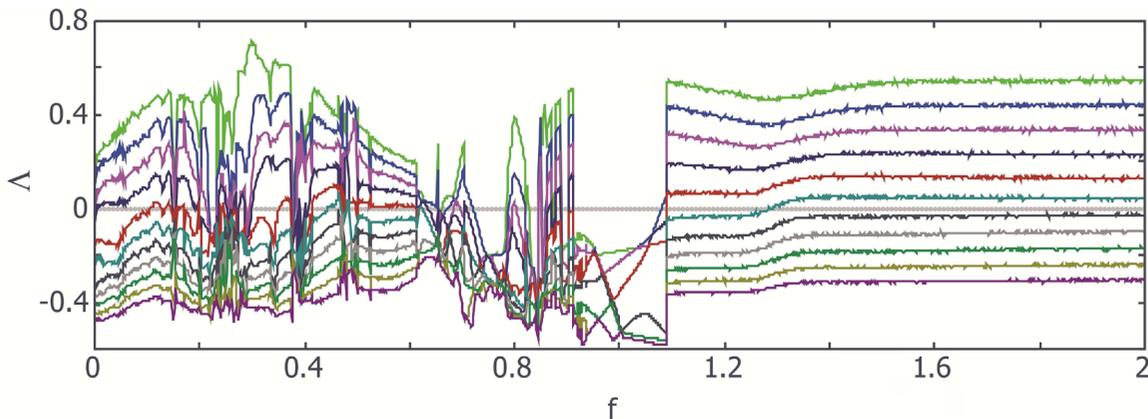


Рис. 2: Спектр условных показателей Ляпунова для замкнутой цепочки из 15 связанных ридберговских атомов под внешним параметрическим воздействием при значении параметров  $\Omega = 2.5$ ,  $\Delta = 0.0$ ,  $M = 0.684$

ходит линейный рост числа положительных ляпуновских показателей.

Для управления сложной динамикой в качестве метода подавления хаотической динамики использовалось введение внешнего параметрического воздействия. В качестве этого воздействия мы брали модуляцию частоты Раби внешним периодическим воздействием, что возможно реализовать в эксперименте:

$$\Omega = \Omega [1 + M \sin(2\pi ft)] \quad (2)$$

где  $M$  — амплитуда, а  $f$  — частота внешнего воздействия.

При значениях управляющих параметров  $\Omega = 2.5$ ,  $\Delta = 0.0$ , соответствующих гиперхаотической динамике, была проанализирована система под внешним воздействием (2) в зависимости от амплитуды и частоты этого воздействия. Для анализа системы под внешним

воздействием использовался расчет спектра условных показателей Ляпунова, в котором, в отличие от спектр обычных показателей, отсутствует один нулевой показатель [6]. На рис. 2. представлен спектр условных показателей Ляпунова, соответствующий исследуемой системе под внешним воздействием при значениях управляющих параметров  $\Omega$  и  $\Delta$ , при которых в автономной системе наблюдается хаотическая динамика. Периодическая динамика в системе соответствует моменту, когда в спектре старшим показателем является отрицательный. Из рисунка видно, что существуют области параметра  $f$ , при которых в системе происходит подавление хаоса и наблюдается периодическая динамика. Аналогичные результаты были получены и при изменении амплитуды внешнего воздействия  $M$  при постоянных значениях частоты  $f$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-32-20299).

- [1] *Lukin M. D.* et al. Phys. Rev. Lett. **85**. P. 2208. (2000).  
[2] *Greenland P. T.* et al. Nature. **465**. P. 1057. (2010).  
[3] *Schwarzschild B.* Phys. Today. **62**. P. 15. (2009).  
[4] *Saffman M., Walker T. G.* Reviews of Modern Physics. **82**. P. 2313. (2010).  
[5] *Lee T. E., Haffner H., Cross M. C.* Phys. Rev. A. **84**. P. 031402(R). (2011).  
[6] *Hramov A. E., Koronovskii A. A.* Phys. Rev. E. **71**. N6. P. 067201. (2005).

## Chaotic dynamics and control of it in the Rydberg atoms chains

**A. V. Andreev**<sup>1,2,a</sup>, **O. I. Moskalenko**<sup>1,2,b</sup>, **A. A. Koronovskii**<sup>1,2,c</sup>, **A. E. Khramov**<sup>1,2,d</sup>

<sup>1</sup>*Department of Open System Physics, Faculty of Nonlinear Process, Saratov State University. Saratov 410012, Russia*

<sup>2</sup>*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov 410054, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>andreevandv@gmail.com, <sup>b</sup>o.i.moskalenko@gmail.com, <sup>c</sup>alexey.koronovskii@gmail.com, <sup>d</sup>hramovae@gmail.com*

The nonlinear dynamic and chaos in the system of Rydberg atom chain is studied. Chaotic dynamics is revealed. The method for suppression of chaos by external parametric impact in the system is offered.

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Mt

Keywords: Rydberg atoms, Rydberg state, dipole blockade, chaos, suppression of chaos.

### Сведения об авторах

1. Андреев Андрей Викторович — лаборант-исследователь; тел.: (845) 251-21-11, e-mail: andreevandv@gmail.com.
2. Москаленко Ольга Игоревна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (845) 251-21-11, e-mail: o.i.moskalenko@gmail.com.
3. Короновский Алексей Александрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (845) 251-21-11, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com.
4. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (845) 251-21-11, e-mail: hramovae@gmail.com.