

виготовлення аналогів сиру. Високий вміст білка, хороша розчинність дозволятимуть формувати білково-жирові системи із високою енергетичною цінністю та споживчими властивостями.

Подальші дослідження будуть направлені на визначення біологічної цінності розроблених аналогів сиру за кількісним і якісним складом амінокислот та їх доступності системі травлення при розробленні складних сирних композицій в яких будуть наявні тваринні а також комплекс текстуроформуєчих наповнювачів (полісахариди, гідроколоїди, крохмаль).

DOI: 10.51587/9781-7364-13395-2022-008-277-283

ТЕРНОВСЬКИЙ Валентин Борисович,

д-р фіз.-мат. наук, доцент,

Інститут Військово-Морських Сил

Національного університету «Одеська морська академія»

ORCID ID: 0000-0002-4402-4157

Україна

ХАОС-КІБЕРНЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЮ НЕЛІНІЙНЕЙНОЇ ДИНАМІКИ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ РІДБЕРГІВСЬКИХ АТОМНИХ СИСТЕМ

Сучасний стан теорії динамічних систем та хаосу або в більш загальному уявленні, нелінійної теорії, викладено в цілому ряді відомих монографій, оглядів і статей. Серед них багато робіт присвячені класично-механічним або квантово-механічним дослідженням явища хаосу в таких квантових системах, як атоми та молекули, а також ядра у зовнішніх (магнітному, електричному лазерному) полях.

Однією з важливих характеристик нелінійної динамічної системи, безперечно, є дивний аттрактор, тобто, деяка складно влаштована множина в фазовому просторі, що притягує до себе хаотичні траєкторії з деякої прилягаючої області (басейну атрактора). Найменша ціла розмірність простору, що містить весь аттрактор, називається розмірністю вкладення m . Вона відповідає кількості незалежних змінних, що однозначно визначає усталений рух динамічної системи. Множина, відповідна дивному

атрактору, є фрактальною. Фрактальна множина (самоподібний об'єкт) характеризується дробовою фрактальною розмірністю¹.

Метою сучасної теорії квантового хаосу є вивчення квантово-механічних систем, які в класичних межах демонструють хаотичні властивості. У випадку квантового хаосу, фактично, мова йде про сукупність нелінійних ефектів, які спостерігаються в багаточисельних осциляторних, атомних, ядерних, молекулярних, лазерних системах, що описуються рівняннями типу Шредінгера або за допомогою матриці щільності.

Одним з актуальних напрямків сучасної квантової (атомної) оптики та спектроскопії безумовно залишається дослідження в області спектроскопії рідбергівських атомів (тобто атомів, які знаходяться у високо збуджених станах з великим значенням головного квантового числа $n \gg 1$).

Унікальні властивості рідбергівських атомів, пов'язані із надто малими потенціалами іонізації, достатньо великими розмірами (характерний розмір рідбергівської орбіти $n^2 a_0 / Z$, $a_0 = \hbar^2 / m e^2$), досить великим часом життя у порівнянні із звичайними атомними станами, нарешті, безпрецедентною чутливістю до зовнішніх електромагнітних полів. Важливо зазначити, що енергетична слабкість рідбергівських електронів у зовнішніх полях відкриває широкі можливості управління властивостями таких систем за допомогою електричних та магнітних полів.

Стандартним підходом при вивченні регулярної та хаотичної динаміки різноманітних складних систем та приладів, як правило, є використання дослідниками лише одного або в кращому випадку двох-трьох методів або алгоритмів, з якими вони вже працювали. Наприклад, дуже розповсюдженим є підхід, коли для ідентифікації феномену хаосу використовується лише метод фрактальних множин або використовується виключно якісна теорія диференціальних рівнянь (в межах класичної механіки), а в її рамках аналізуються особливості прояву хаосу. Як відомо, характерною рисою хаосу є непередбачуваність хаотичної еволюції системи, що пояснюється в основному істотною залежністю від початкових умов (так званий «ефект метелика»). Ще однією особливістю хаосу є експоненціальне накопичення помилки.

Очевидно, що дослідження феномену хаосу у будь-якій складній системі має базуватися на єдиному універсальному підході, що повинен включати

1 Штокман Х. Ю. Квантовый хаос. М.: Фізматліт, 2004. 376 с.

не тільки одну-дві методики, але й максимально широке коло методів та алгоритмів. Отже, саме комплексний підхід може забезпечити адекватне розуміння усіх рис такого складного феномену, як хаос у релятивістських атомних системах в електромагнітному полі.

З метою кількісного моделювання та аналізу хаотичних особливостей спектральної динаміки широкого класу важких рідбергівських атомних систем, а також релятивістських атомних систем в мікрохвильових полях, нами було розвинуто та адаптовано новий універсальний комплексний апарат з хаос-кібернетичним і поліноміально-вейвлетним блоком прогнозування, який включає низку нових релятивістських моделей і ряд удосконалених методів нелінійного аналізу, зокрема, кореляційно-інтегральний аналіз, фрактальний та вейвлет-аналіз, методи середньої взаємної інформації, хибних найближчих сусідів, апарат аналізу показників Ляпунова, спектральні методи, нові методи нелінійного прогнозу та передбачених траєкторій з вперше побудованим поліноміально-вейвлетним блоком тощо².

Новий підхід має принципово важливу рису, а саме, не залежить від типу та фізичної природи досліджуваних систем (приладів). Більш того, він є цілком прийнятним й у випадку встановлення основних характеристик відносно як просто релятивістського хаосу, так й релятивістського квантового хаосу, де мова йде про аналіз та прогнозування еволюції релятивістських атракторів.

Ключовим тезисом при дослідженні спектрів хаотичних систем і, зокрема, квантових систем, є та обставина, що за визначенням квантовий хаос трактується, насамперед, як властивість групи станів спектрів системи. Саме трактування одного з механізмів виникнення квантового хаосу через індукування резонансів в спектрі системи, їх сильну взаємодію з подальшим злиттям, виникненням стохастичних шарів й далі – до глобальної стохастичності в системі, призвело до того, що найбільш розповсюдженим критерієм наявності хаосу в спектральних дослідженнях (особливо з точки зору механізму перекриття та злиття резонансів) є критерій хаосу Чірікова. В цій схемі перекриття нелінійних резонансів визначається як відношення суми напівширин резонансів до відстаней між ними:

$$K = [(\Gamma_2/2) + (\Gamma_1/2)]/|E_2 - E_1|, \quad (1)$$

2 Глушков О. В., Хецеліус О. Ю., Кругляк Ю. А., Терновський В. Б. Обчислювальні методи в квантовій геометрії та теорії хаосу, Ч. 3: навч. посіб. Одеса: ТЕС, 2014. 180 с.

де Γ_i та E_i – є відповідно ширина та енергія «і»-го резонансу. Зазвичай вважається, що при достатньо великих значеннях ($K \geq 4$) в системі реалізується феномен хаосу.

До числа спектральних характеристик, які, як правило, обчислюються при дослідженні елементів хаосу в спектрах систем, відносяться: відносна величина міжрівневих відстаней, функція розподілу відносної величини міжрівневих відстаней, спектральна жорсткість, коефіцієнти кореляції величин енергетичних інтервалів, спектр міцності.

Відносна величина міжрівневих відстаней S_n стандартно визначається як:

$$S_n = (E_n - E_{n-1}) \cdot \rho(E_n), \quad (2)$$

де $\rho(E)$ – щільність рівнів.

Функція $P(S)$ розподілу відносної величини міжрівневих відстаней S_n , як правило, має вигляд розподілу Пуассона $P_p(S) = \exp(-S)$, якщо положення рівнів в спектрі не є хаотичним (рис. 1 а). У випадку, якщо в системі має місце хаос, реалізується розподіл Вігнера-Дайсона або у загальному виді – розподіл Броді (рис. 1 б).

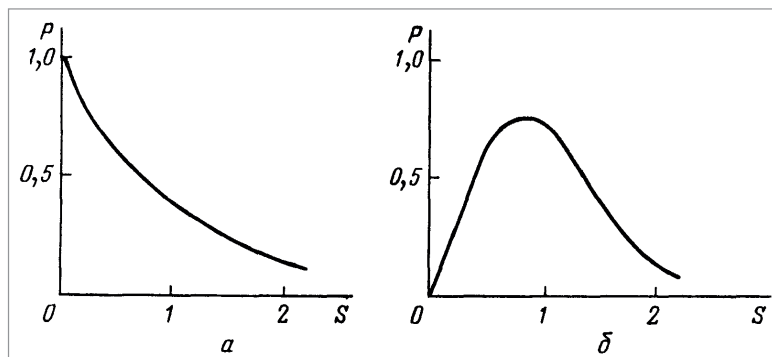


Рис. 1. Граничні форми розподілу міжрівневих відстаней $P(S)$:
а) розподіл Пуассона; б) розподіл Вігнера-Дайсона

Спектральна жорсткість $\Delta_3(L)$ є характеристикою ступеня впорядкованості рівнів в спектрі на великих відстанях в порівнянні з міжрівневою відстанню. Функція $\Delta_3(L)$ описується за допомогою виразу:

$$\Delta_3(x, L) = \frac{1}{L} \min_{A, B} \int_x^{x+L} (n(\varepsilon) - A\varepsilon - B)^2 d\varepsilon. \quad (3)$$

При розгляді визначення треба мати на увазі, що для послідовності рівнів ε_n , нормованих на одиничну щільність $\varepsilon_n = (\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)$, використано ступінчасту функцію $n(\varepsilon)$, рівну числу рівнів з $\varepsilon_n \leq \varepsilon$. За побудовою $n(\varepsilon)$ має вигляд сходів з одиничним в середньому нахилом. Значення $\langle \Delta_3(L) \rangle$, усереднене за значеннями

х з області, в якій характер флуктуації спектра можна вважати незмінним, залежить тільки від L і позначається $\Delta_3(L)$. Функція $\Delta_3(L)$ описує впорядкованість спектра на великих ділянках: чим повільніше росте $\Delta_3(L)$ з ростом L , тим менш вірогідні в спектрі тісні кластери рівнів і лакуни зі зниженою щільністю рівнів.

Коефіцієнти кореляції $C(n)$ величин енергетичних інтервалів, розділених фіксованим числом рівнів, визначаються як:

$$C(n) = \frac{\sum_i (S_{i+n-1})(S_i-1)}{[\sum_i (S_{i+n-1})^2 \sum_i (S_i-1)^2]^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

Нарешті, ще однією з найбільш розповсюджених характеристик є так званий спектр міцності, який визначається стандартним чином. Докладніше характеристика спектральних методів наведена в роботі³.

Основна ідея побудови нового хаос-кібернетичного підходу до прогнозування хаотичних особливостей динаміки релятивістських рідбергівських атомних систем пов'язана з використанням уявлення компактного геометричного атрактора в фазовому просторі системи, на якому еволюціонують дані обчислень (вимірювань), плюс концепція багатофункціональної алгебраїчної апроксимації часової еволюції фазової траєкторії системи.

Важливим аспектом нашого підходу є використання наступної моделі. Згідно з роботою⁴, у фазовому просторі системи деяка орбіта безперервно згортається на саму себе внаслідок дії нелінійної частини динаміки або додаткових механізмів, у т. ч. дії дисипативних сил тощо. Внаслідок цього в околицях будь-якої точки орбіти $F(n)$ можуть знаходитись інші точки $F^r(n), r = 1, 2, \dots, N_b$, які прибувають в околицю $F(n)$ в різні моменти часу. Головний крок полягає в побудові параметризованих нелінійних функцій $G(F, c)$, які перетворюють $F(n)$ в $F(n+1) = G(F(n), c)$, а далі з використанням різноманітних існуючих алгоритмів є можливим визначення параметрів c . Зокрема, після визначення розмірності моделі D за допомогою методу часових лагів відновлюється векторний часовий ряд, який містить $N_{train} - D + 1$ членів. Базовою моделлю для визначення G є поліном порядку K :

$$G(F_1, F_2, \dots, F_D) = \sum_{l_1=l_2=\dots=l_D=0}^K b_{l_1 l_2 \dots l_D} \prod_{i=1}^D t_i^{l_i} \sum_{j=1}^D l_j, \quad (5)$$

3 Ternovsky V. B., Svinarenko A. A., Ignatenko A. V., Nikola V. V., Seredenko S. S., Tkach T. B. Advanced relativistic model potential approach to calculation of radiation transition parameters in spectra of multicharged ions / Journal of Physics: C Series (IOP, London, UK). 2014. Vol. 548. P. 012047 (6 p.).

4 Prepelitsa G. P., Glushkov A. V., Lepikh Ya. I., Buyadzi V. V., Ternovsky V. B., Zaichko P. A. Chaotic dynamics of non-linear processes in atomic and molecular systems in electromagnetic field and semiconductor and fiber laser devices: new approaches, uniformity and charm of chaos / Sensor Electronics and Microsystems Techn. 2014. Vol. 11, № 4. P. 43–57.

де відповідні коефіцієнти визначаються таким чином, щоб середньоквадратична похибка апроксимації ε (5) була мінімальною (стандартна схема – метод найменших квадратів):

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{N_{tr}-D} \sum_{i=1}^{N_{tr}-D} [F_{i+D} - G(F_i, F_{i+1}, \dots, F_{i+D-1})]^2 = \min. \quad (6)$$

Оскільки невідомі коефіцієнти $b_{l_1 l_2 \dots l_D}$ входять лінійно, задача їх визначення стандартно зводиться до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які мають звичайний матричний вигляд:

$$A^T \cdot A \cdot B = A^T \cdot E, \quad (7)$$

де A – матриця (верхній індекс T означає транспонування) значень базисних функцій (розмірності $(N_{tr} - D) \cdot B$); B – вектор коефіцієнтів моделі (розмірності M); E – вектор значень апроксимуючої величини (розмірності $N_{tr} - D$).

Крім поліноміальної моделі типу (5) для аналізу динаміки систем та приладів надвисокочастотної (НВЧ) електроніки в нашому підході також запропонований та реалізований блок вейвлет-розкладання, який використовується в прогнозних блоках еволюції атрактора в фазовому просторі. В якості вейвлету використано так званий Mexican hat вейвлет, який має вигляд:

$$\Psi(t) = (1 - t^2) \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (8)$$

Як показали багаточисельні тести прогнозної моделі, використання вейвлет-розкладань є більш ефективним у порівнянні зі стандартними поліноміальними моделями.

Вейвлет-перетворення з притаманним йому самоналагоджувальним рухомим частотно-часовим вікном однаково добре виявляє як низькочастотні, так й високочастотні характеристики сигналу на різних часових масштабах (іншою мовою, це своєрідний «математичний мікроскоп», що розкриває внутрішню структуру істотно неоднорідних об'єктів).

Фактично весь хаос-кібернетичний підхід до аналізу та прогнозуванню нелінійної динаміки релятивістських рідбергівських атомних систем може бути коротко описаний у вигляді комплексу ряду алгоритмів⁵:

І) аналітичне та чисельне розв'язання фундаментальних динамічних рівнянь (систем рівнянь), що описують відповідні хаотичні системи, зокрема, релятивістські рідбергівські атомні системи у електромагнітному

5 Glushkov A. V., Svinarenko A. A., Buyadzh V. V., Ternovsky V. B., Zaichko P. A. Chaos-geometric attractor and quantum neural networks approach to simulation chaotic evolutionary dynamics during perception process / Advances in Neural Networks, Fuzzy Systems and Artificial Intelligence, Series: Recent Advances in Computer Engineering, Ed. J. Balicki (World Sci. Pub.). 2014. Vol. 21. P. 143–150.

полі, отримання відповідних просторово-часових та інших рядів основних динамічних характеристик систем;

II) хаос-кібернетичне дослідження рядів основних динамічних характеристик систем: застосування попередніх загальних критеріїв існування елементів хаосу в динаміці системи, у т. ч. використання тесту Готтвода і Мелбена, розкладень Фур'є, спектральних методів, аналіз статистики енергетичного спектру, спектру міцності, наявності розподілу Вігнера-Дайсона тощо;

III) реконструкція та визначення фазового простору системи: вибір часового лагу з використанням методу автокореляційної функції та алгоритму середньої взаємної інформації, визначення різних типів розмірностей, зокрема, з використанням методу кореляційного інтегралу та алгоритму помилкових найближчих сусідніх точок, нарешті, методів мультифрактальної геометрії;

IV) хаос-кібернетичне дослідження характеристик хаосу в динаміці систем з подальшою побудовою моделей прогнозу динаміки системи у майбутньому, тобто прогнозом розвитку релятивістського хаосу: визначення характеристик хаосу у системі, зокрема, топологічних та динамічних інваріантів хаотичної системи (у т. ч. аналіз показників Ляпунова, обчислення ентропії Колмогорова тощо), прогноз еволюції хаотичних систем з використанням моделей поліноміальних та вейвлет-розкладань.

На основі розробленого універсального комплексного апарату виконано кількісне хаос-кібернетичне моделювання динаміки іонізації рідбергівських ($n = 60 - 80$) атомів рубідію *Rb* (тест), цезію *Cs*, францію *Fr* в мікрохвильовому НВЧ полі [5].

Нові дані по квантовому хаосу представляють інтерес для суміжних фізичних напрямків, зокрема, квантового комп'ютингу, квантової криптографії, фізики квантово-оптичних приладів та ін.

DOI: 10.51587/9781-7364-13395-2022-008-283-289