

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ РАСШИРЕННЫХ ОРБИТ В КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ

Рыбин В. В.¹, Рудый С. С.¹, Кропотов А. А.¹
Научный руководитель – к. ф.-м. н., Щербинин Д. П.¹

¹Университет ИТМО
vadim.rybin@itmo.ru

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-22-00694.

Введение

Левитодинамика является новым направлением современной физики, находящим применение в областях как фундаментальных [1, 2], так и прикладных исследований [3]. Техники левитодинамики позволяют удерживать одиночные объекты – от атомарных ионов до микрочастиц – в ограниченном пространстве за счёт их взаимодействия с физическими полями. В частности, для решения задач прецизионной сенсорики и материаловедения набирают популярность левитодинамические системы на базе локализованных в квадрупольных электродинамических ловушках массивных частиц [2, 4-8]. Особый интерес в решении подобных задач имеют нелинейные левитодинамические системы, в которых реализуются расширенные орбиты движения локализованных частиц. Спектральный состав трансляционных осцилляций движущихся по расширенной орбите частиц чувствителен к внешним воздействиям, что может быть использовано для точной характеристики как свойств частицы, так и параметров воздействия [6-8]. Таким образом, важной задачей является разработка методов возбуждения и контроля расширенных орбит локализованных в квадрупольных ловушках частиц.

Основная часть

В работе рассматривается возможность применения сколлимированного непрерывного лазерного излучения для возбуждения расширенных орбит движения у заряженных диэлектрических микросфер, локализованных в вертикальной конфигурации квадрупольной ловушки в присутствии разряженного буферного газа. В вертикально ориентированной квадрупольной ловушке аксиальная динамика локализованной частицы ограничена торцевым электродом, что позволяет свести задачу к анализу двумерной динамики частицы в радиальной плоскости. Воздействие сколлимированного лазерного излучения на сферическую микрочастицу обусловлено двумя механизмами [9]. Во-первых, это рассеивающая сила, действующая вдоль направления распространения лазерного луча и пропорциональная его оптической мощности. Во-вторых, это градиентная сила, направленная к оси луча, величина которой пропорциональна как оптической мощности излучения, так и смещению частицы от оси. Таким образом, радиальная динамика частицы определяется тремя основными факторами: силой со стороны электрического поля ловушки, диссипацией энергии при вязком трении о буферный газ и взаимодействием с лазерным излучением. Поскольку механизмы диссипации энергии в системе сложно поддаются контролируемому изменению в ходе эксперимента, с практической точки зрения, основной интерес представляет анализ поведения частицы при изменении соотношения между параметрами удерживающего поля ловушки и параметрами лазерного излучения.

Движение частицы в квадрупольной ловушке под действием лазерного излучения анализировалось численно посредством решения задачи Коши со случайным выбором начальных условий. В процессе моделирования анализировалось как траектория

движения локализованной частицы, так и спектральный состав её трансляционных осцилляций. Было показано, что в системе возможна реализация нескольких типов расширенных орбит с модами на частотах, кратных, $\omega/2, \omega/3, \omega/4$ и $\omega/5$, где ω – частота электрического поля ловушки. На основе полученных данных была построена карта динамических режимов в широком диапазоне параметров удерживающего поля ловушки и характеристик лазерного излучения.

Выводы

В работе была исследована динамика одиночных заряженных микросфер, локализованных в квадрупольной ловушке, под действием лазерного излучения. Было показано, что в системе возможна реализация сразу нескольких типов расширенных орбит в зависимости от соотношения параметров лазерного излучения и питания ловушки. Была построена карта указанных нелинейных динамических режимов в плоскости управляющих параметров. Возможность реализации оптически-индуцированных нелинейных динамических режимов открывает новые возможности применения нелинейных левитодинамических систем в направлениях сенсорики и метрологии.

Литература

1. Gonzalez-Ballester C. et al. Levitodynamics: Levitation and control of microscopic objects in vacuum //Science. – 2021. – V. 374. – №. 6564. – P. eabg3027. <https://doi.org/10.1126/science.abg3027>
2. Aggarwal N. et al. Searching for new physics with a levitated-sensor-based gravitational-wave detector //Physical review letters. – 2022. – V. 128. – №. 11. – P. 111101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.111101>
3. Jin Y. et al. Towards real-world applications of levitated optomechanics //arXiv preprint arXiv:2407.12496. – 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.12496>
4. Bonvin E. et al. Hybrid Paul-optical trap with large optical access for levitated optomechanics //Physical Review Research. – 2024. – V. 6. – №. 4. – P. 043129. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.043129>
5. Xiong C. et al. Mass, size, and density measurements of microparticles in a quadrupole ion trap //Analytical chemistry. – 2019. – V. 91. – №. 21. – P. 13508-13513. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b02574>
6. Rybin V., Rudyi S., Rozhdestvensky Y. Nano-and microparticle nonlinear damping identification in quadrupole trap //International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2022. – V. 147. – P. 104227. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104227>
7. Rybin V. et al. Novel nonlinear damping identification method: Simultaneous size, mass, charge and density measurements of a microparticle in quadrupole trap //Powder Technology. – 2023. – V. 427. – P. 118717. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118717>
8. Rybin V. et al. Phase transition between linear and nonlinear motion in a quadrupole-trap-based levitodynamic system with massive particles //Physical Review A. – 2025. – V. 112. – №. 3. – P. 033501. <https://doi.org/10.1103/wh14-rd9k>
9. Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime //Biophysical journal. – 1992. – V. 61. – №. 2. – P. 569-582. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(92\)81860-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(92)81860-X)