

Использование гибридного анапольного состояния для селективной оптомеханической сортировки наночастиц в поле лазерного пучка

С.Р. Розенталь*, Д.А. Кислов

Московский физико-технический институт

*E-mail: rozentalsr@phystech.edu

DOI:10.31868/RFL.2024.119-122

В настоящее время большой интерес в нанофотонике представляют анапольные состояния [1], которые характеризуются обнулением дальнего поля от одного из возбуждаемых в частице мультиполей. За счет отсутствия рассеяния, анапольные состояния способны накапливать энергию, что позволяет в дальнейшем их использовать, например, для лазерной генерации [2]. Условием возникновения анапольного состояния является деструктивная интерференция базовых мультипольных моментов в частице и тороидальных поправок к ним [1]:

$$\mathbf{M}_{car} + i\frac{k}{c}\mathbf{T}^{(M)} = 0$$

где $\mathbf{M}_{car}$ – мультипольный момент, $\mathbf{T}^{(M)}$ – соответствующая ему тороидальная поправка, k – волновое число, c – скорость света.

Анапольные состояния не являются полностью нерассеивающими, так как в частице могут возбуждаться несколько мультиполей, дающих ненулевой вклад в поле. Однако недавно было обнаружено, что при некоторых условиях в частице могут существовать сразу несколько анаполей разных порядков, причем суммарное сечение рассеяния у такой частицы падает почти до нуля. Такие режимы рассеяния были названы *гибридными анапольными состояниями (ГАС)* [3, 4]. В наночастицах, имеющих форму шара, наложение нескольких анаполей невозможно, поэтому в данной работе была выбрана форма цилиндра, допускающая существование в частице нескольких анаполей разных порядков при одной длине волны. Была рассмотрена наночастица из кремния ($n \approx 3.55$), помещенная в перетяжку линейно-поляризованного Гауссова пучка – рис. 1.

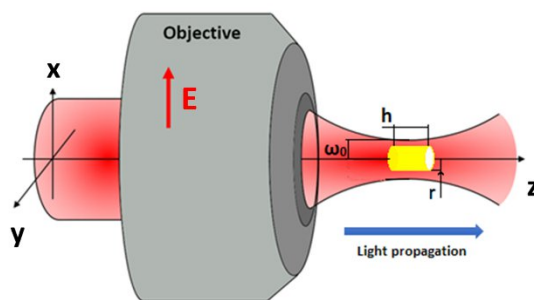


Рис. 1. Схема моделируемой системы. Лазерное излучение, проходя через объектив, фокусируется до ширины перетяжки w_0 .

На наночастицу, помещенную в электромагнитное поле излучения, действуют оптические силы, которые зависят от сечения рассеяния [5]. Была выдвинута гипотеза, что оптомеханическое взаимодействие в ГАС будет отлично от взаимодействия в рассеивающем состоянии, а значит можно будет сортировать наночастицы таким образом. Целью работы являлось сравнение оптомеханики анапольных и рассеивающих частиц.

На первом этапе было выполнено численное моделирование системы в программе COMSOL Multiphysics. Для определения параметров гибридного анапольного состояния при длине волны излучения 1064 нм (соответствующей лазеру YAG:Nd3+) была применена методика мультипольной декомпозиции поляризационных токов, позволяющая вычислить полное сечение рассеяния частицы [6]:

$$\sigma_{sca} = \frac{k^4}{6\pi\epsilon_0 |E_{inc}|^2} \left[\sum_{\alpha} \left(|p_{\alpha}|^2 + \left| \frac{m_{\alpha}}{c} \right|^2 \right) + \frac{1}{120} \sum_{\alpha,\beta} \left(|kQ_{\alpha\beta}^e|^2 + \left| k \frac{Q_{\alpha\beta}^m}{c} \right|^2 \right) + \frac{1}{315} \sum_{\alpha,\beta,\gamma} \left(|k^2 O_{\alpha\beta\gamma}^e|^2 + \left| k^2 \frac{O_{\alpha\beta\gamma}^m}{c} \right|^2 \right) \right]$$

Где E_{inc} – напряженность падающего поля, k – его волновое число, p и m – электрический магнитный диполи, Q^e , Q^m – квадруполь, O^e , O^m – октополи.

На рис. 2 представлены графики зависимости полного сечения рассеяния и его мультипольных компонент от радиуса и высоты наночастицы.

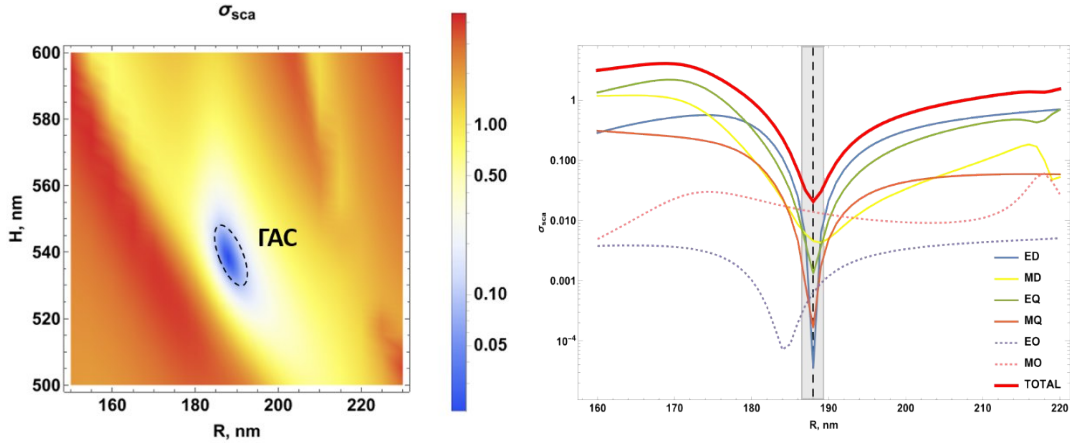


Рис. 2. Слева – карта зависимости полного сечения рассеяния от высоты и радиуса частицы, справа – зависимость мультипольных компонент рассеяния от радиуса частицы. Пунктиром помечено гибридное анапольное состояние.

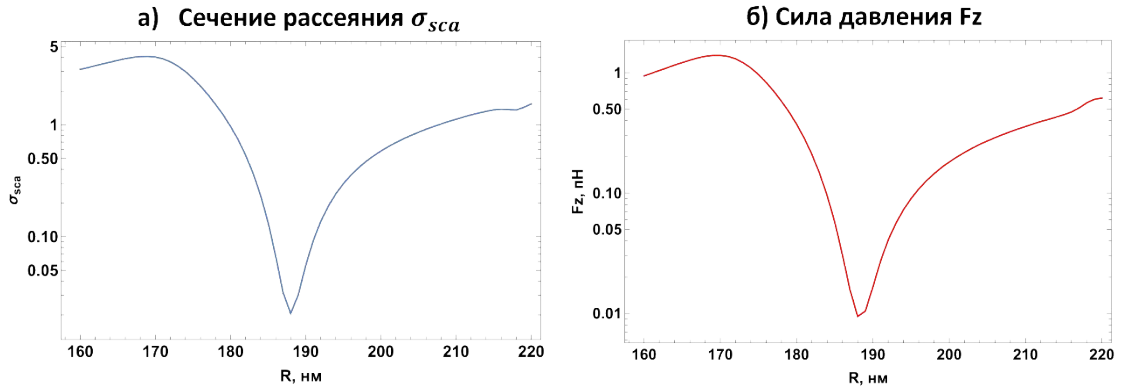


Рис. 3. Зависимость полного сечения рассеяния (слева) и силы давления на оси пучка (справа) от радиуса наночастицы.

На карте зависимости от R и H обведена область провала сечения рассеяния $R = 188$ нм, $H = 538$ нм. Справа изображен график зависимости сечения рассеяния от радиуса при фиксированной высоте. Из него видно, что в серой области сразу 4 мультиполя находятся в анапольном состоянии: 2 диполя и 2 квадруполь, то есть найденное состояние действительно является ГАС.

Рассмотрим силу давления, которая пропорциональна сечению рассеяния и в ГАС также имеет минимум – рис. 3.

Зачастую при оптическом захвате сила давления является «паразитной» и стремится вытолкнуть частицу из перетяжки. Поэтому ее уменьшение в ГАС может позволить избежать этого эффекта.

Помимо силы давления на частицу действуют поперечные силы F_x и F_y , возникающие только при смещении частицы с оси перетяжки. По результатам исследования были выбраны 4 значения радиусов (170 нм, 180 нм, 188 нм (ГАС) и 210 нм), для каждого из которых построена карта зависимости вектора суммарной поперечной силы от смещения частицы в плоскости XY – рис. 4.

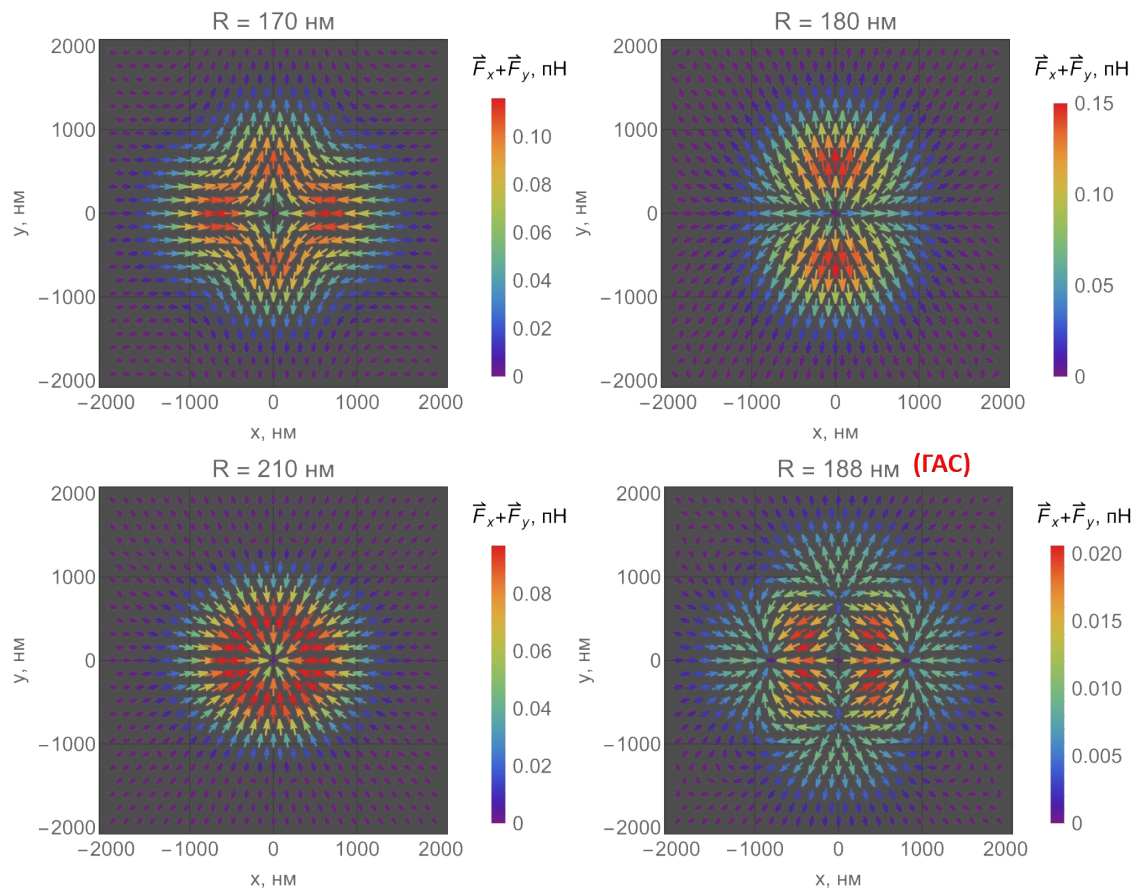


Рис. 4. Карты зависимости суммарного сектора поперечной силы от координат x и y наночастицы с радиусами 170 нм, 180 нм, 210 нм и 188 нм (ГАС).

При радиусе 210 нм наблюдается классическая картина, соответствующая захвату частицы в центре перетяжки. При 180 нм – несимметричное выталкивание из центра, а при 170 нм – неустойчивое равновесие типа «седло». Все 3 найденных случая уже наблюдались ранее, причем для сферических неананольных частиц [7]. Интерес представляет карта в гибридном анапольном состоянии, имеющая 2 точки захвата на оси x , отличные от нуля, и 2 точки выталкивания на оси y . Такая картина является уникальной особенностью ГАС и обусловлена вкладом мультиполей высших порядков в рассеяние.

Для моделирования движения частицы в заданных полях было решено уравнение Ланжевена, включающее в себя найденные поперечные силы, силу трения о среду (воздух) и случайную силу. В качестве начальных координат были взяты 20 произвольных точек в плоскости перетяжки, начальные скорости равны нулю. На рис. 5 и 6 изображены траектории частиц, полученные в результате моделирования для ГАС и нерассеивающего состояния ($R = 210$ нм).

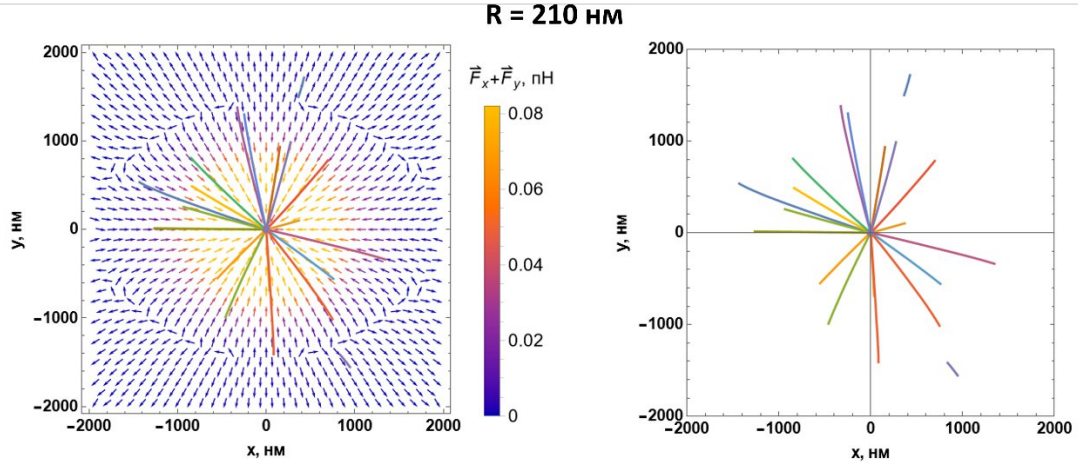


Рис. 5. Траектории движения частиц с радиусом 210 нм в плоскости XY.

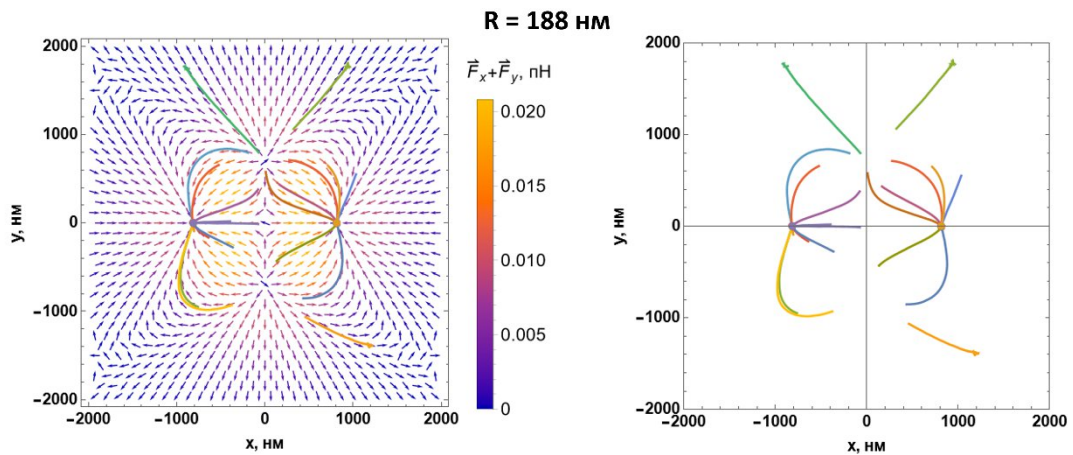


Рис. 6. Траектории движения частиц с радиусом 188 нм в плоскости XY.

Сравнивая траектории видим, что частицы с радиусом 210 нм будут концентрироваться на оси пучка, тогда как частицы с радиусом 188 нм, которые находятся в ГАС, будут притягиваться в точки на оси x с координатами порядка ± 800 нм.

Таким образом, было обнаружено, что при одинаковых параметрах излучения, наночастицы с разными радиусами будут двигаться по-разному, что позволит производить их сортировку. В отличие от метода сортировки частиц с помощью набора неколлинеарных лазерных пучков разных длин волн, предложенного в работе [8], в нашем методе требуется только один пучок, а сортировка осуществляется за счет уникальных свойств ГАС и близких к нему состояний.

Литература

- [1] E. A. Gurvitz, K. S. Ladutenko et al, *Laser Photonics Rev.* **13**, 1–13 (2019)
- [2] A. Tripathi et al, **21**, 1-7 (2021)
- [3] B. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Domínguez et al, *Phys. Rev. A* **95**, 1–8 (2017)
- [4] A. Canós Valero et al., *Laser Photonics Rev.* **15**, 1–14 (2021)
- [5] H. Li et al, *Adv. Opt. Photonics* **12**, 288-366 (2020)
- [6] R. Alaei, C. Rockstuhl, I. Fernandez-Corbaton, *Opt. Commun.* **407**, 17–21 (2018)
- [7] D. A. Kislov et al, *Adv. Photonics Res.* **2**, 1–11 (2021)
- [8] D. A. Shilkin, E. V. Lyubin et al, *ACS Photonics*, **4**, 2312–2319 (2017)