

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА СФЕРИЧЕСКИМ МИКРОЧАСТИЦАМ

© 2006 Р.В. Скиданов, В.В. Котляр, С.Н. Хонина

Институт систем обработки изображений РАН

Экспериментально исследовано движение сферических полистироловых микрочастиц диаметром 5 мкм в лазерном пучке с орбитальным угловым моментом. Проведено сравнение между экспериментальными и теоретическими данными.

### Введение

Круговое движение микрочастиц в световых пучках с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ), объясняется передачей ОУМ светового пучка микрочастице за счет поглощения части энергии [1]. В работе [2] было проведено экспериментальное исследование скорости движения в зависимости от порядка оптического вихря. К сожалению, данные полученные в этой работе не позволяют провести сравнения с теорией, т.к. экспериментах при определении средней скорости использовались данные по всем микрочастицам попавшим в световой пучок, в том числе и по тем частицам, которые под воздействием локального изменения силы трения и вовсе останавливались. В данной работе предлагается методика расчета средней скорости, которая позволяет избавиться от этого недостатка.

### Эксперимент

Схема экспериментальной установки для вращения прозрачных микрочастиц представлена на рис. 1

В эксперименте был использован твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 500 мВт. В целях минимизации потерь мощности при отражениях на преломляющих поверхностях пучок не коллимируется, а нужный размер достигается увеличением расстояния между лазером и первым поворотным зеркалом. Поворотное зеркало  $M_1$  направляет световой пучок на ДОО, затем микрообъектив  $L_1$  фокусирует пучок в рабочую область внутри кюветы  $V$  с микрочастицами, микрообъектив  $L_2$  формирует изображение рабочей области, а зеркало  $M_2$  поворачивает световой пучок в направлении горизонтально расположенной телекамеры.

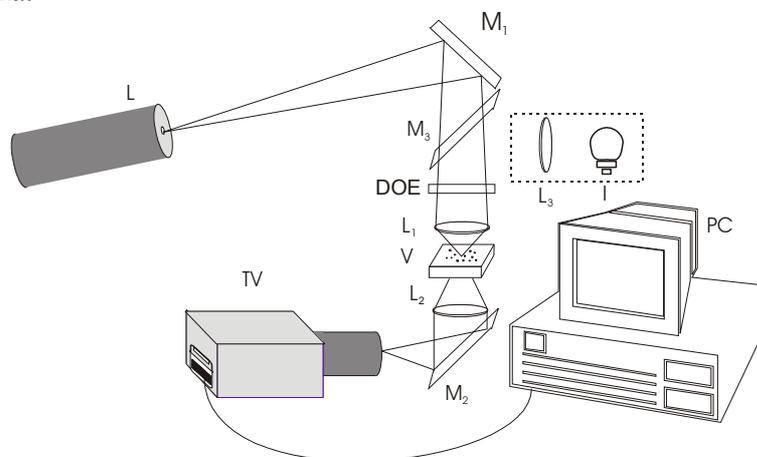
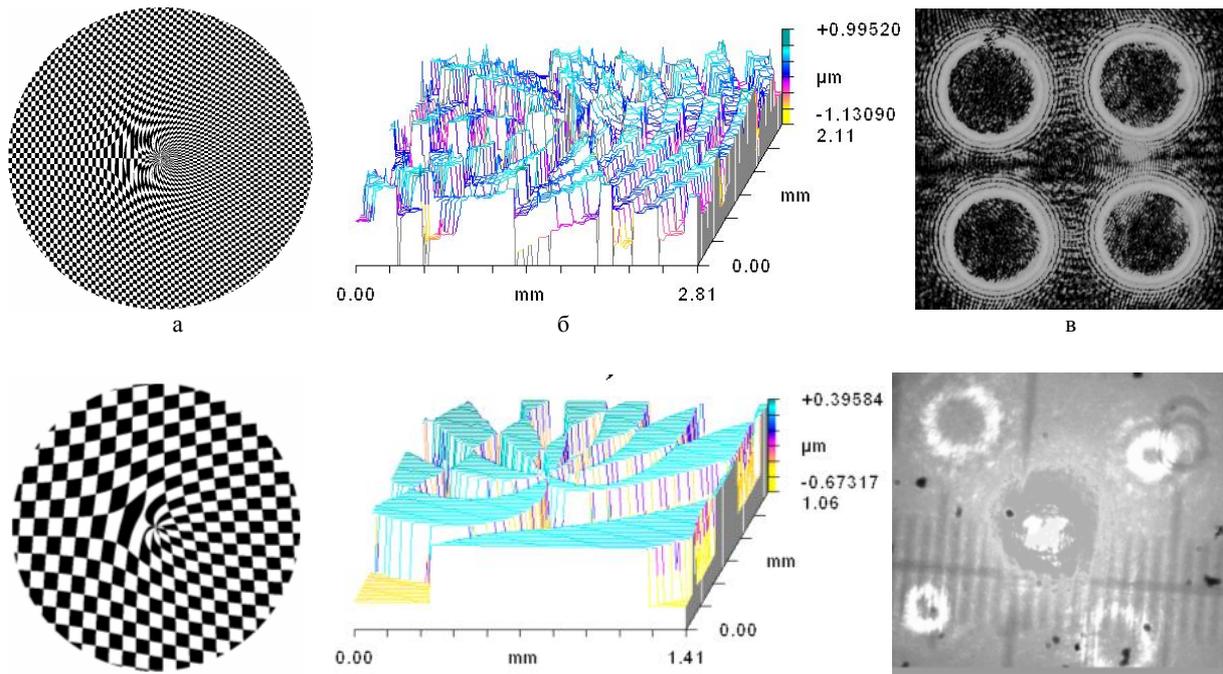


Рис.1. Схема экспериментальной установки для манипуляции микрообъектами:

L - твердотельный лазер,  $M_1$  - поворотное зеркало,  $M_3$  - полупрозрачное зеркало для освещения рабочей области,  $M_2$  - второе поворотное зеркало,  $L_1$  - фокусирующий микрообъектив (40×),  $L_2$  - микрообъектив, строящий изображение рабочей области (20×),  $L_3$  - линза осветителя, I - лампа осветителя, V - кювета с микрочастицами, TV - видеокамера, PC - компьютер



**Рис. 2.** Фаза ДОО для формирования оптических вихрей -31, -30, 30, 31 порядков (а), фаза ДОО для формирования оптических вихрей -7, -3, 3, 7 порядков (г), представлены центральные части микрорельефа этих элементов соответственно (б, д), а также распределения интенсивности в картинах дифракции соответственно (в, ж)

Лампа I и линза  $L_3$  формируют фоновое освещение. В качестве микрочастиц использовались полистироловые микрошарики с диаметром 5 мкм.

Для формирования набора из 4-х оптических вихрей (с номерами порядков -31, -30, 30, 31) использовался ДОО, бинарная фаза которого представлена на рис.2а. На рис. 2б представлена центральная часть микрорельефа. Бинарная фаза другого ДОО, который также формирует четыре оптических вихря, но с меньшими номерами порядков ( $\pm 3, \pm 7$ ) показана на рис.2г. Центральная часть рельефа этого ДОО представлена на рис. 2д. На рис.2в и 2ж соответственно показаны распределения интенсивности для каждого из элементов в зоне дифракции Фраунгофера.

Для сравнения движения микрочастиц в различных световых пучках наиболее удобно использовать среднюю скорость движения. Для определения средней скорости было разработано специальное программное обеспечение позволяющее обрабатывать и выделять микрочастицы на последовательности изображений [2]. На рис. 3 представлен пример такой обработки. Для экспериментального кадра рис.3а строится функция корреляции

(рис.3б), а затем текущие координаты микрочастицы определяются исходя из положения максимума корреляционного пика.

На рис. 4 представлены обработанные картинки, на которых хорошо видны именно микрочастицы, и почти не видно пучка. Для автоматического определения скорости вычислялась функция корреляции с одним из изображений частиц. После этого координаты частицы определялись по координатам максимума корреляционного пика.

Как видно из рис. 4 часть микрочастиц, в ходе движения вдоль светового кольца, на какое то время останавливается или сильно замедляет движение. Этот эффект вызван неоднородность силы трения о дно кюветы (коэффициент трения может заметно меняться для микрочастиц).

Для минимизации влияния этого эффекта средняя скорость вычисляется в два этапа:

1. Определяется средняя скорость по всему времени движения и по всему ансамблю микрочастиц попавших в пучок:

$$\langle v_i \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t |\vec{v}_i(t)| dt, \quad (1)$$

где  $t$  – время наблюдения,  $\vec{v}_i(t)$  - скорость

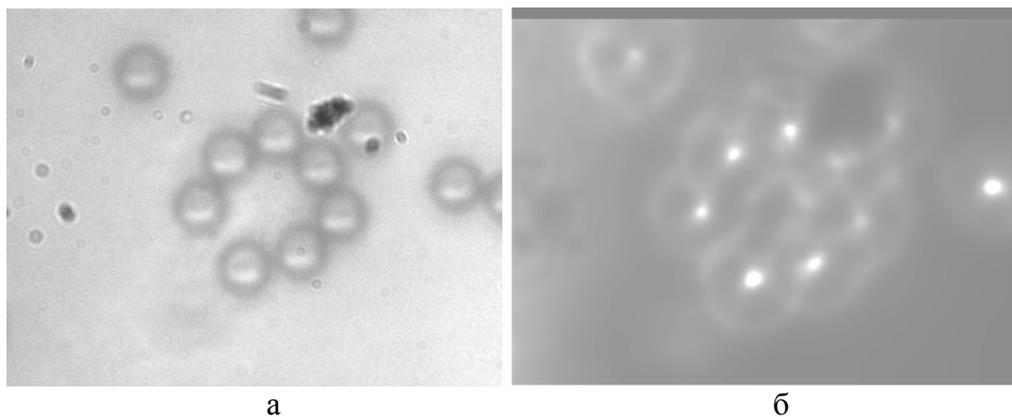


Рис. 3. Обработка экспериментального кадра (а) с изображением микрочастиц с целью определения их местоположения по корреляционным пикам (б).

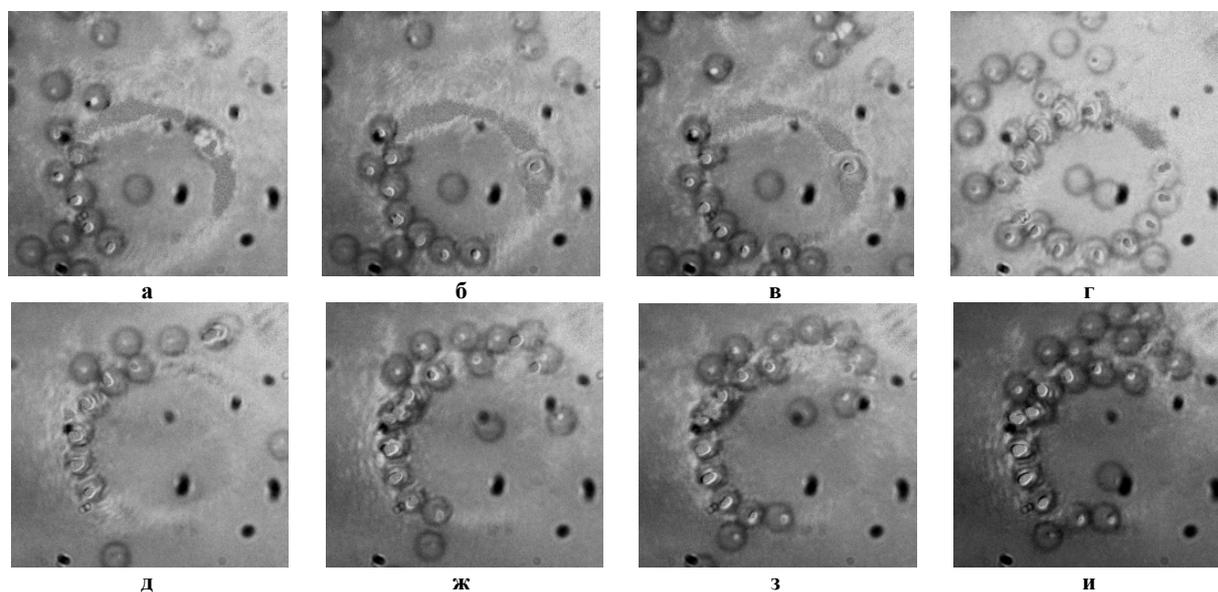


Рис. 4. Различные стадии движения микрочастиц в вихревых пучках, сформированных ДОО: (рис. 2а)(а-г) оптический вихрь 30-го порядка, (рис.2а)(д-и) оптический вихрь 31-го порядка, после компьютерной обработки изображений

движения микрочастицы в зависимости от времени. Средняя скорость  $V$  по ансамблю микрочастиц:

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle v_i \rangle. \quad (2)$$

2. Из формулы (1) удаляются моменты времени в которые  $\bar{v}_i < \frac{\langle v_i \rangle}{2}$ , в результате определяется новая средняя по времени скорость

$$\langle v_i \rangle' = \frac{1}{t} \int_0^t |\bar{v}_i(t)| dt, \bar{v}_i > \frac{\langle v_i \rangle}{2}. \quad (3)$$

И на основании этих новых данных вычисляется новая общая средняя скорость  $V'$

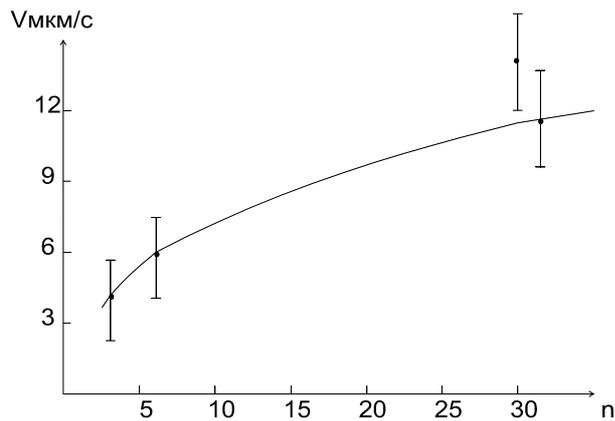
$$V' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle v_i \rangle'. \quad (4)$$

Для определения средней скорости по этой методике был использован набор экспериментальных данных полученных в [2]. На основании этих данных была составлена табл. 1.

Согласно [1] передаваемый микрочастице орбитальный угловой момент светового поля может быть выражен формулой

$$M = \frac{\lambda n P}{2\pi c} \eta_{abs}. \quad (5)$$

где  $M$  – передаваемый момент,  $l$  – длина волны,  $n$  – порядок сингулярности,  $P$  – мощность пучка,  $\eta_{abs}$  – коэффициент поглощения мик-



**Рис. 5.** Теоретическая зависимость скорости движения сферических микрочастиц диаметром 5 мкм от номера сингулярности светового поля (кривая), экспериментальные данные по зависимости скорости движения сферических микрочастиц диаметром 5 мкм от номера сингулярности светового поля (точки с отрезками)

рочастиц. Используя эту формулу и считая, что для одной из экспериментально полученных точек наблюдается полное совпадение, строится теоретическая кривая зависимости скорости движения микрочастиц от номера сингулярности. На рис. 5 представлена эта кривая с наложенными на нее экспериментальными точками с погрешностями.

Несмотря на некоторую субъективность данных по средней скорости в табл. 1. как видно из графика на рис. 5 экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретическими в пределах погрешности эксперимента.

## Заключение

Предложена методика обработки экспериментальных данных минимизирующая искажающие факторы, основанная на двухэтапной обработке экспериментальных данных. Показано совпадение экспериментальных данных по средней скорости движения микрообъектов, с теоретически рассчитанной средней скоростью в пределах погрешности эксперимента.

## Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке российско-американской программы “Фундаментальные исследования и высшее образование” (грант CRDF RUXO – 014-SA-06), а также гранта РФФИ 05-08-50298, 07-07-97600, а также при поддержке “Фонда содействия отечественной науке”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *G. Mingwei, G. Chunqing, and I. Zhifeng* Generation and application of the twisted beam with orbital angular momentum // *Chinese optics letters*, v. 5, No. 2, (2007).
2. *Скиданов Р.В., Хонина С.Н., Котляр В.В., Соيفер В.А.* Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков // *Компьютерная оптика*. 2007. №31.

**Таблица 1.** Сравнительные параметры экспериментов.

Порядок оптического вихря	Мощность пучка в рабочей плоскости (мВт) (с учетом потерь)	Средняя интенсивность на самом ярком кольце ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) $\times 10^8$	Диаметр кольца (мкм)	Средняя скорость движения микрочастиц (мкм/с)
3	50	3,2	9	$4 \pm 2$
7	50	2,1	13	$6 \pm 2$
30	40	0,9	27	$14 \pm 3$
31	40	0,9	28	$11 \pm 3$

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE TRANSFER OF AN ANGULAR ORBITAL MOMENTUM TO SPHERICAL MICROPARTICLES

© 2006 R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina

Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences, Samara

Experimental studies of motion of spherical polystyrene microparticles of diameter 5 mm in the laser beams with an orbital angular momentum is studied experimentally/ Comparisson is made between the experimental results and theoretical predictions/