



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

N\* Novosibirsk  
State  
University  
\*THE REAL SCIENCE

NSU  WS  
laboratory

# *Нелинейная динамика многомодового излучения, исследованная методом модовой декомпозиции*

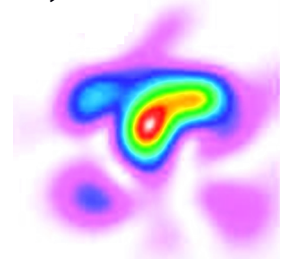
Д.С. Харенко<sup>1,2,\*</sup>, М.Д. Гервазиев<sup>1,2</sup>, Н.Н. Смолянинов<sup>1</sup>,  
М. Ферраро<sup>3</sup>, Ф. Манджини<sup>3</sup>, М. Дзителли<sup>3</sup>,  
С. Вабниц<sup>2,3</sup>, Е.В. Подивилов<sup>1,2</sup>, С.А. Бабин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский Государственный Университет, Россия

<sup>3</sup>Университет Сапиенца, Рим, Италия

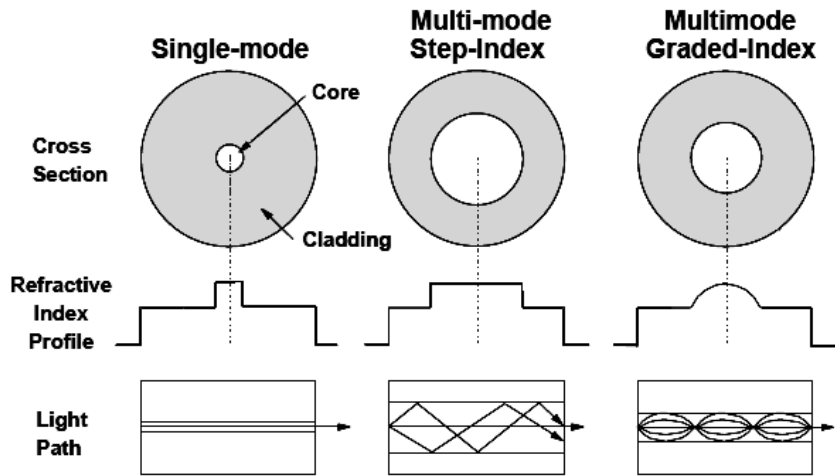
ОУС по физическим наукам, 21 декабря 2022 г.



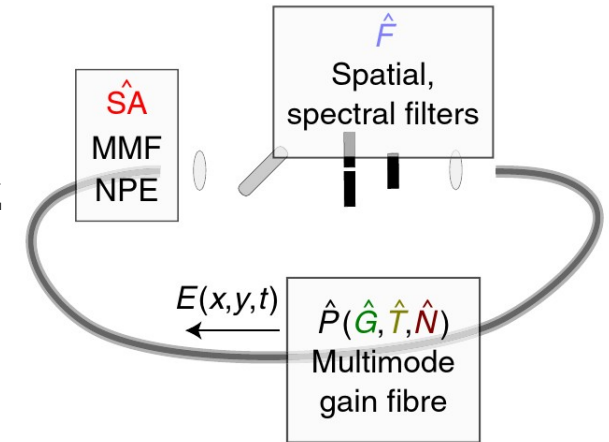


# Многомодовость — дополнительная степень свободы

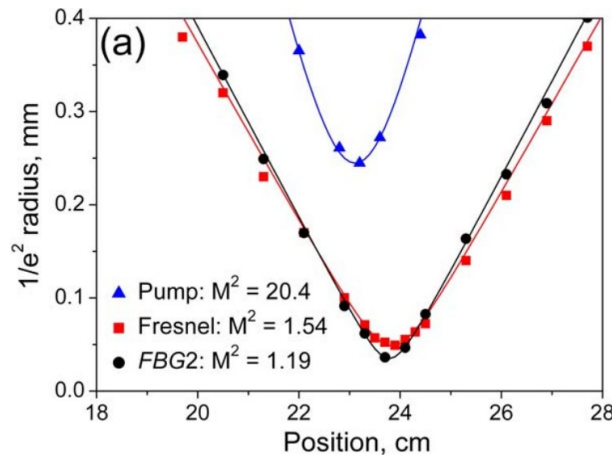
для лазеров непрерывных [1] и с синхронизацией мод [2],  
для фундаментальных нелинейных эффектов и проектирования устройств [3].



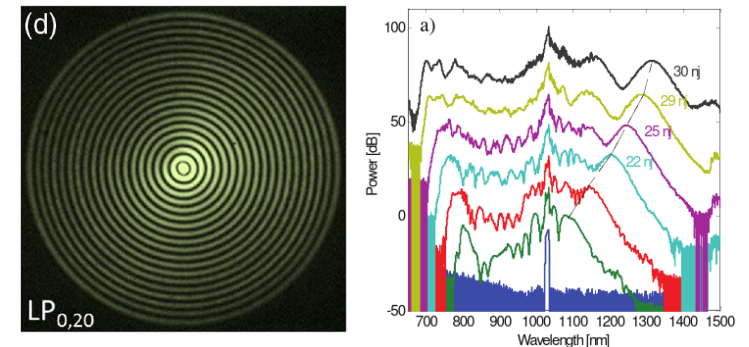
- Пространственно-временная синхронизация мод



- Увеличение качества пучка



- Новые условия для фазового синхронизма и компенсации ДГС



[1] E. A. Zlobina et al, *Optics Letters*, **42**, 9 (2017)

[2] L. Write et al, *Science*, **358**, 94 (2017)

[3] I. Cristiani et al, *Journal of Optics*, **24**, 083001 (2022)



# Свойства поперечных мод волокна



- Поле  $U$  можно разложить линейно-поляризованные моды, например Гаусс-Лагерровские (LG):

$$U(\vec{\rho}) = \sum_{p,m=0}^{\infty} B_{pm}^{even} \cdot \psi_{pm}^{even}(\vec{\rho}) + \sum_{p,m=0}^{\infty} B_{pm}^{odd} \cdot \psi_{pm}^{odd}(\vec{\rho})$$

где:

$$\psi_{pm}(\vec{\rho}) = N_{pm} \rho^m L_p^m(\rho^2) e^{\rho^2/2} \begin{cases} \cos(m\varphi), & \text{чётн.} \\ \sin(m\varphi), & \text{нечётн.} \end{cases}$$

$$N_{pm} = \left( \int_R |\psi_{pm}|^2 \right)^{-1/2}, \vec{\rho} = \frac{\sqrt{2}\vec{r}}{w_0}$$

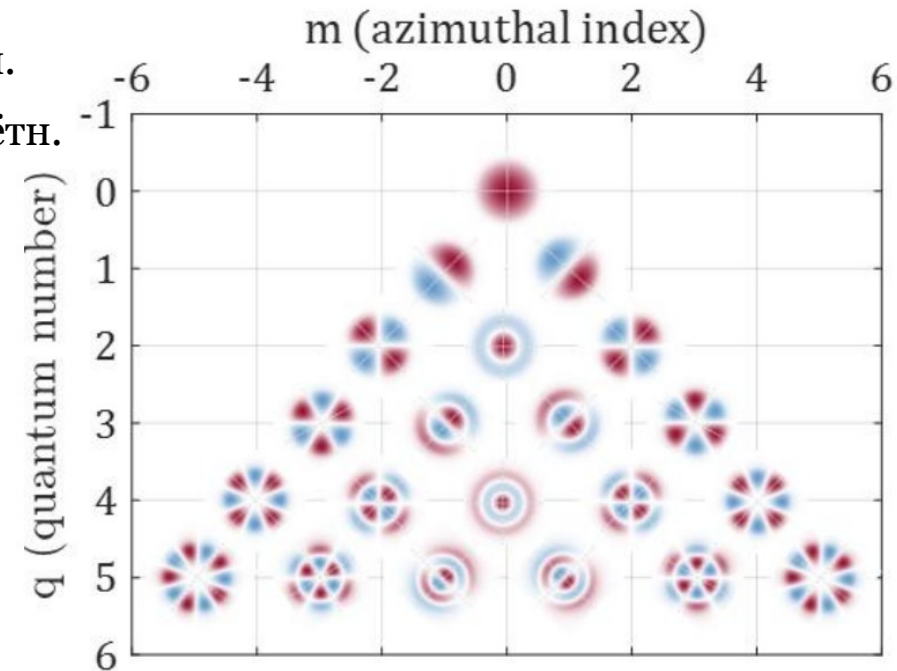
- Моды ортогональны а их веса отнормированы:

$$\langle \psi_{pm} | \psi_{p'm'} \rangle = \delta_{pp',mm'}$$

$$\sum_{p,m=0}^{\infty} (|B_{pm}^{even}|^2 + |B_{pm}^{odd}|^2) = 1,$$

- Тогда амплитуда моды определяется скалярным произведением:

$$B_{pm} = \langle U | \psi_{pm}^* \rangle$$





# Оптическое «скалярное произведение»

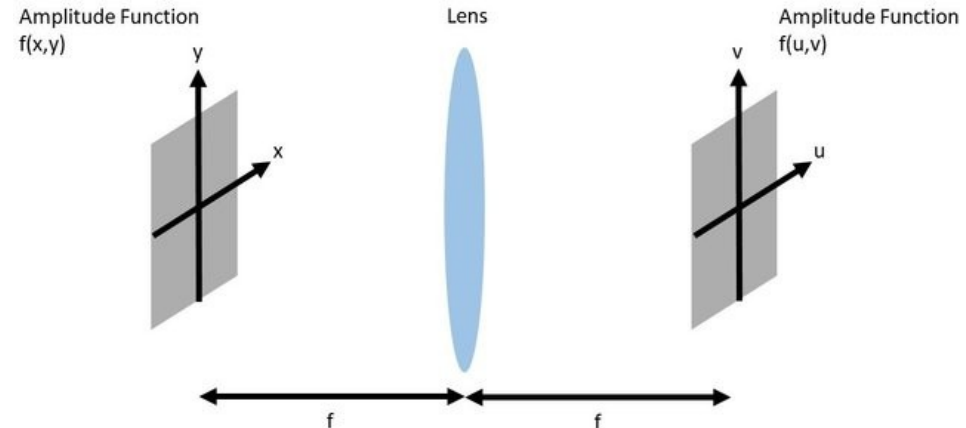


- Распишем скалярное произведение по определению:

$$B_{pm} = \langle U | \psi_{pm}^* \rangle = \iint_R U(x, y) \cdot \psi_{pm}^*(x, y) dx dy$$

- Известно, что тонкая линза работает как фурье-процессор:

$$F(u, v) = \iint_R f(x, y) \cdot \exp(iux + ivy) dx dy$$



- При прохождении экрана происходит перемножение исходного поля с его функцией пропускания  $f(x, y) = U(x, y) \cdot T(x, y)$  которую можно обозначить как  $T(x, y) = \psi_{pm}^*(x, y)$

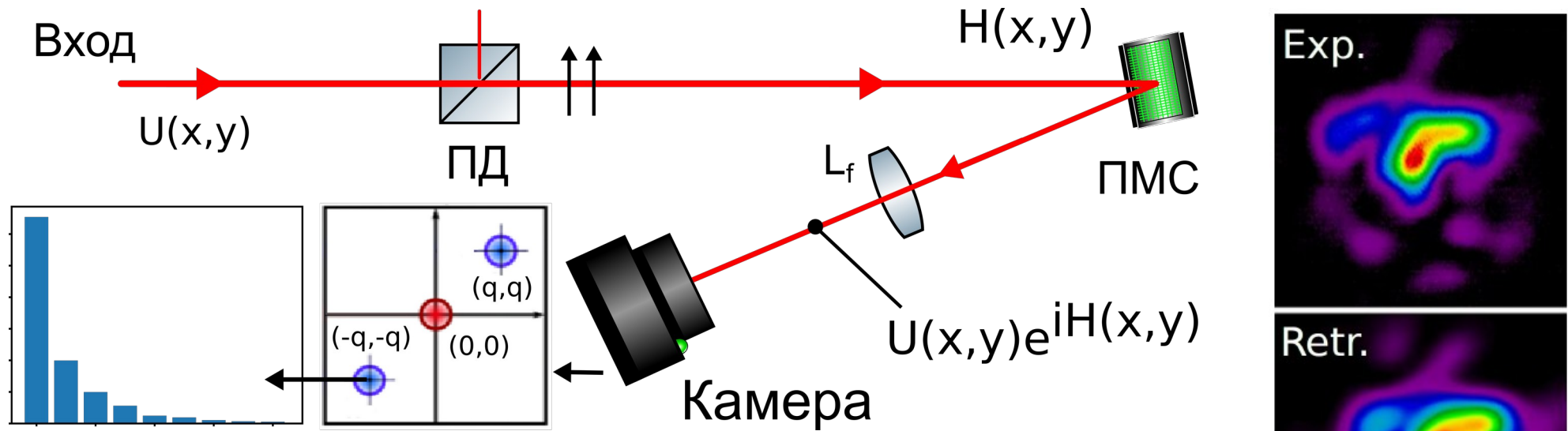
- Тогда в точке (0,0) Фурье-плоскости имеем:

$$F(u, v)|_{0,0} = \iint_R U(x, y) \cdot \psi_{pm}^*(x, y) \cdot \exp(i(ux + vy)) dx dy \Big|_{0,0} = \langle U | \psi_{pm}^* \rangle = B_{pm}$$

**Решение** — использовать пространственный модулятор света.



# Схема эксперимента по модовому анализу

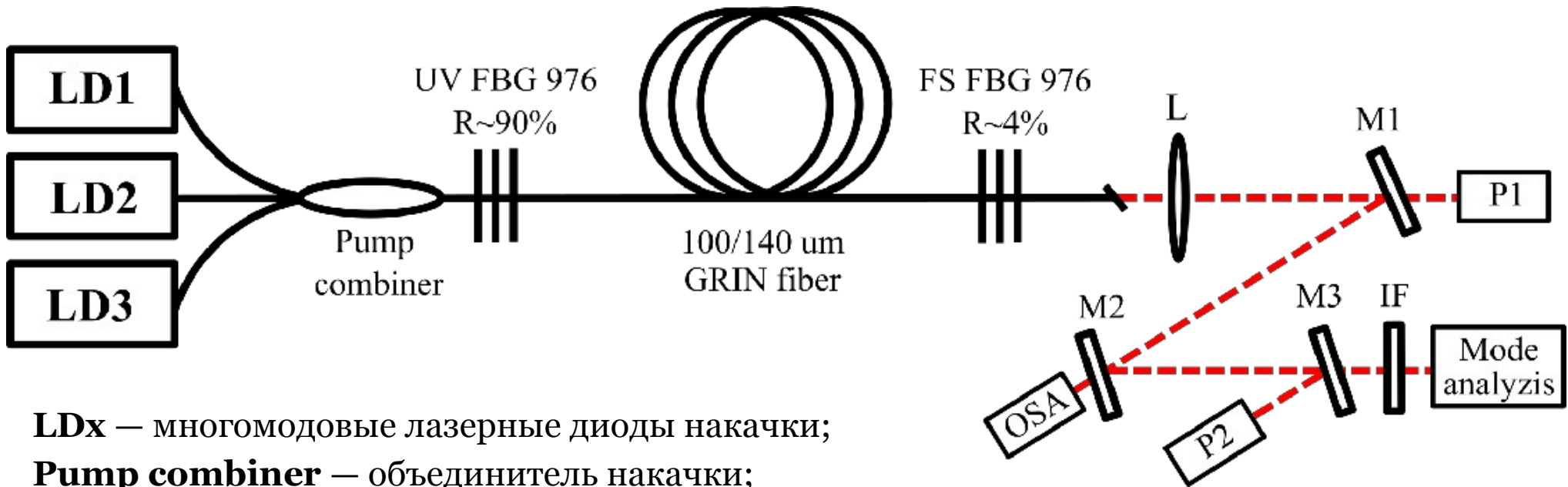


- $U(x,y)$  — входное поле
- ПД — поляризационный делитель
- $H(x,y)$  — накладываемое распределение фазы
- ПМС — пространственный модулятор света
- $L_f$  — фурье-линза
- $(q,q)$  — центр первого корреляционного максимума

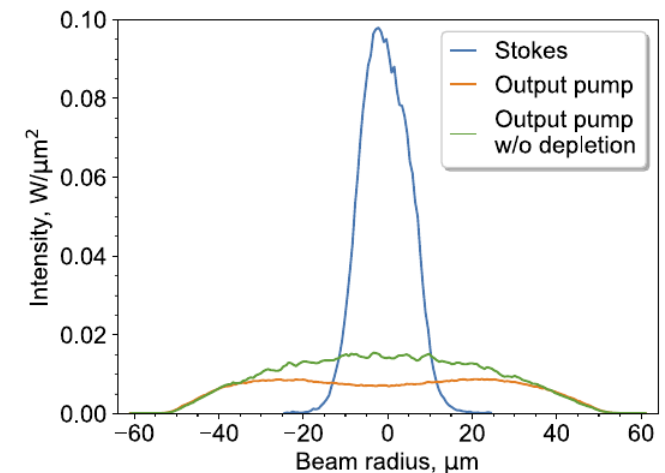
С помощью декомпозиции возможно восстановить  
**амплитуды и фазы** мод для спекл-пучков!



# Схема многомодового ВКР-лазера

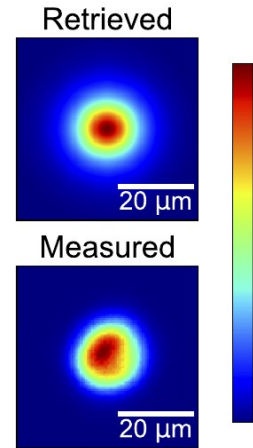
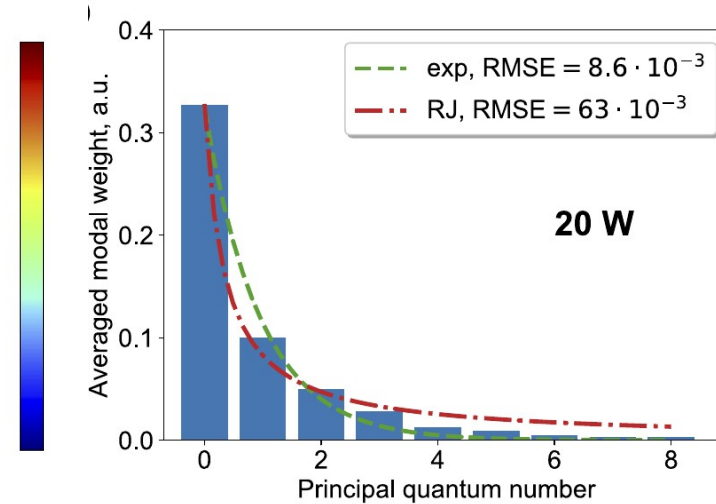
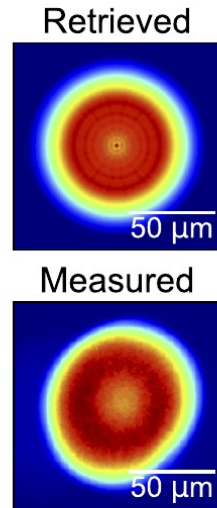
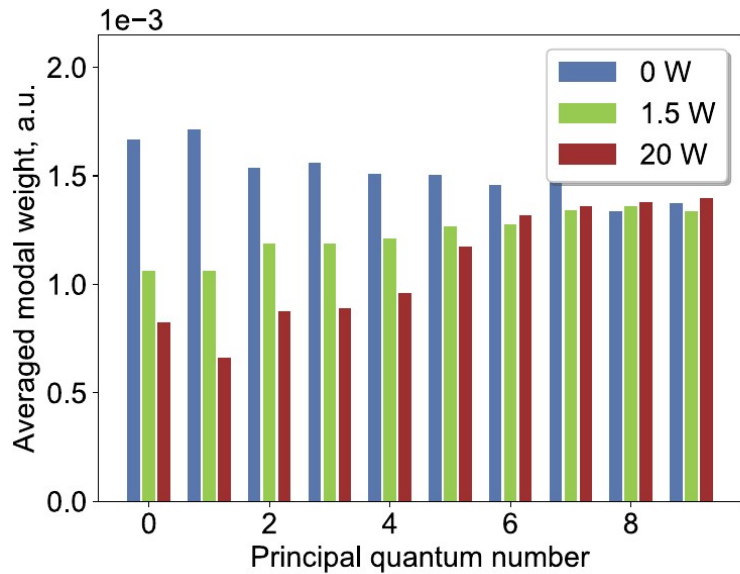


- LD $x$**  — многомодовые лазерные диоды накачки;
- Pump combiner** — объединитель накачки;
- UV FBG** — сильно-отражающая волоконная брэгговская решетка (ВБР), записанная ультрафиолетовым излучением;
- FS FBG** — слабо-отражающая ВБР, записанная фемтосекундными импульсами в центре волокна;
- L** — коллимирующая линза; **M $x$**  — дихроичные зеркала;
- IF** — полосовой фильтр; **P1, P2** — измерители мощности;
- OSA** — анализатор оптического спектра;
- Mode analysis** — система модового анализа





# Результаты декомпозиции

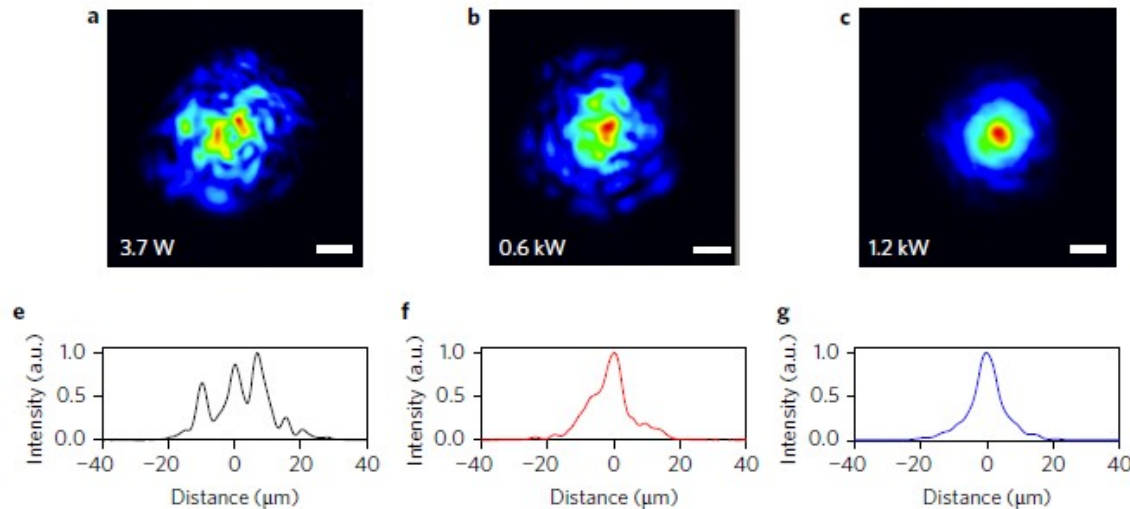


- Выходное излучение прошедшей накачки занимает практически всю сердцевину оптического волокна, то есть возбуждено максимально возможное количество мод.
- Измеренный вклад первых трех мод ( $LG_{0,0}$ ,  $LG_{1,0}$ ,  $LG_{-1,0}$ ) пучка накачки на выходе из резонатора после преодоления порога ВКР уменьшился в среднем на 25%

- Сигнальный пучок в основном состоит из фундаментальной моды (40%) и мод со значением главного квантового числа 1 (20%)
- Энергия распределена по модам по экспоненциальному закону

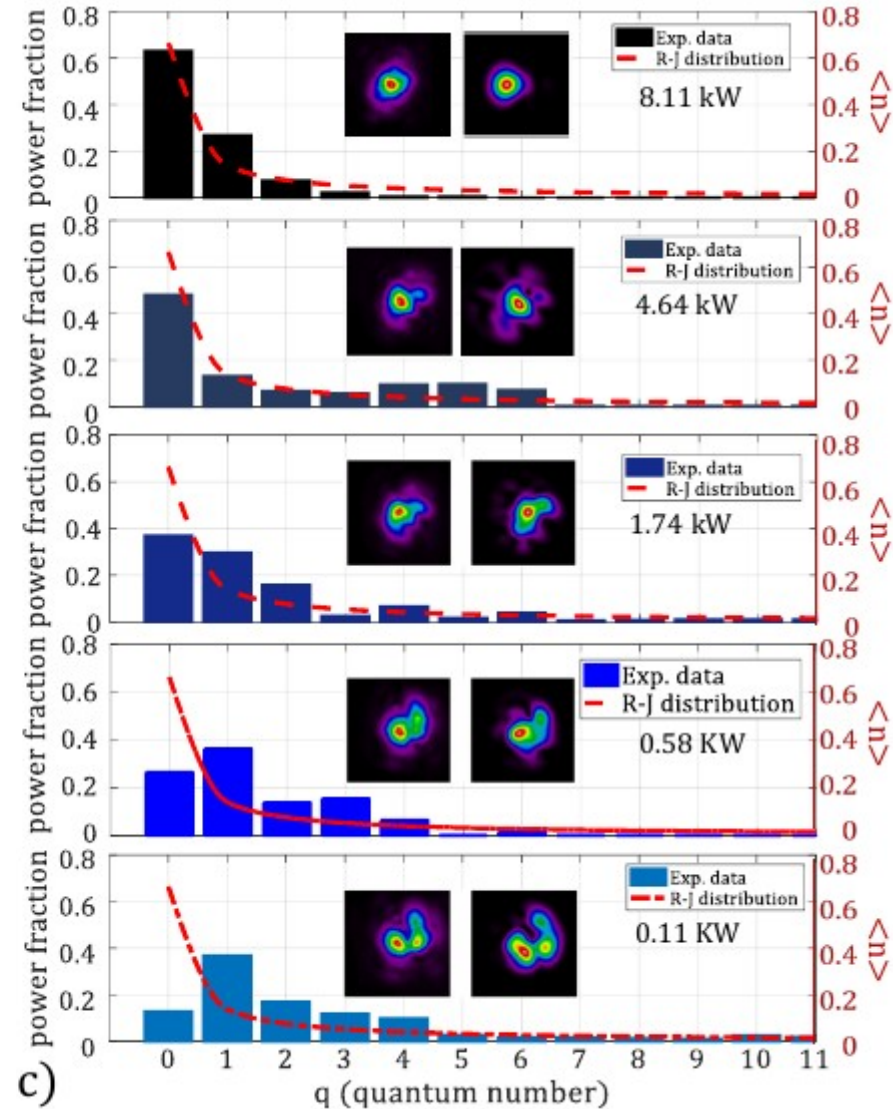


# Керровская самоочистка пучка



- Эффект улучшения качества ( $M^2$ ) многомодового пучка с ростом мощности
- При различных длительностях импульсов (150 фс — 1 нс) итоговое распределение энергии по модам стремится к распределению Рэля-Джинса

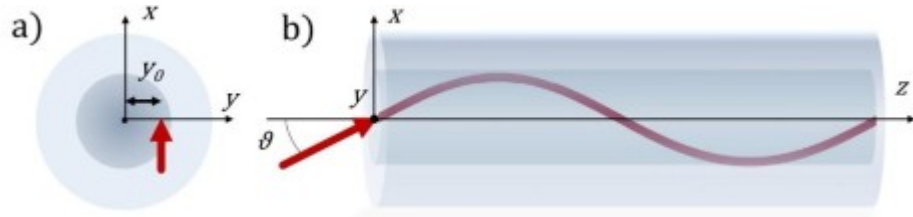
- Показано установление состояния «термализации»  
$$\langle n_{\ell,m} \rangle = \frac{K_B T}{\hbar k_{\ell,m} - \mu N}$$







# Спиральные пучки (с орбитальным угловым моментом)

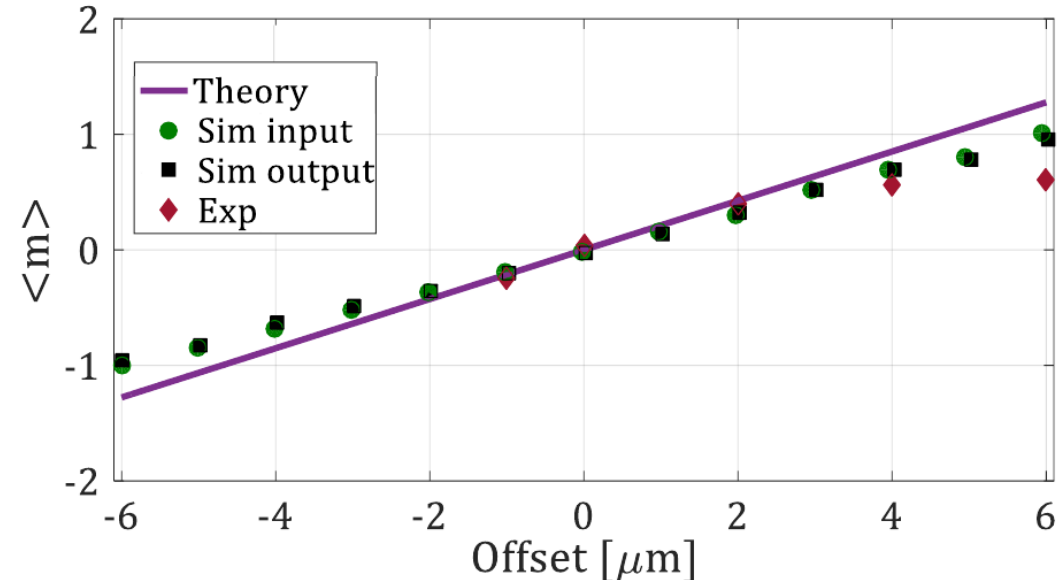
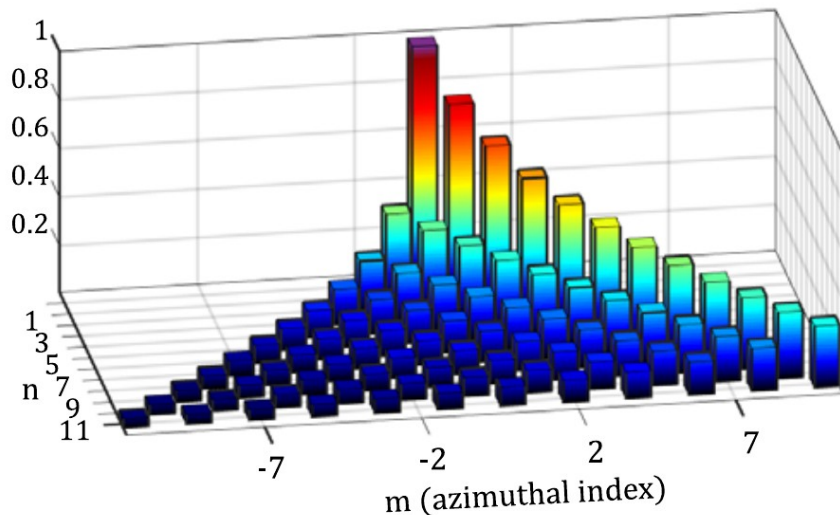


- Для возбуждения пучков с орбитальным угловым момент (ОАМ) излучение заводилось под углом и с отстройкой от центра сердцевины

Обобщённое распределение Рэлея-Джинса: 
$$N_{\ell,m} = \frac{N_{0,0}}{1 - (2\pi V/L_B \tilde{\mu})(2\ell + |m|) + (\Omega/\tilde{\mu})m}$$

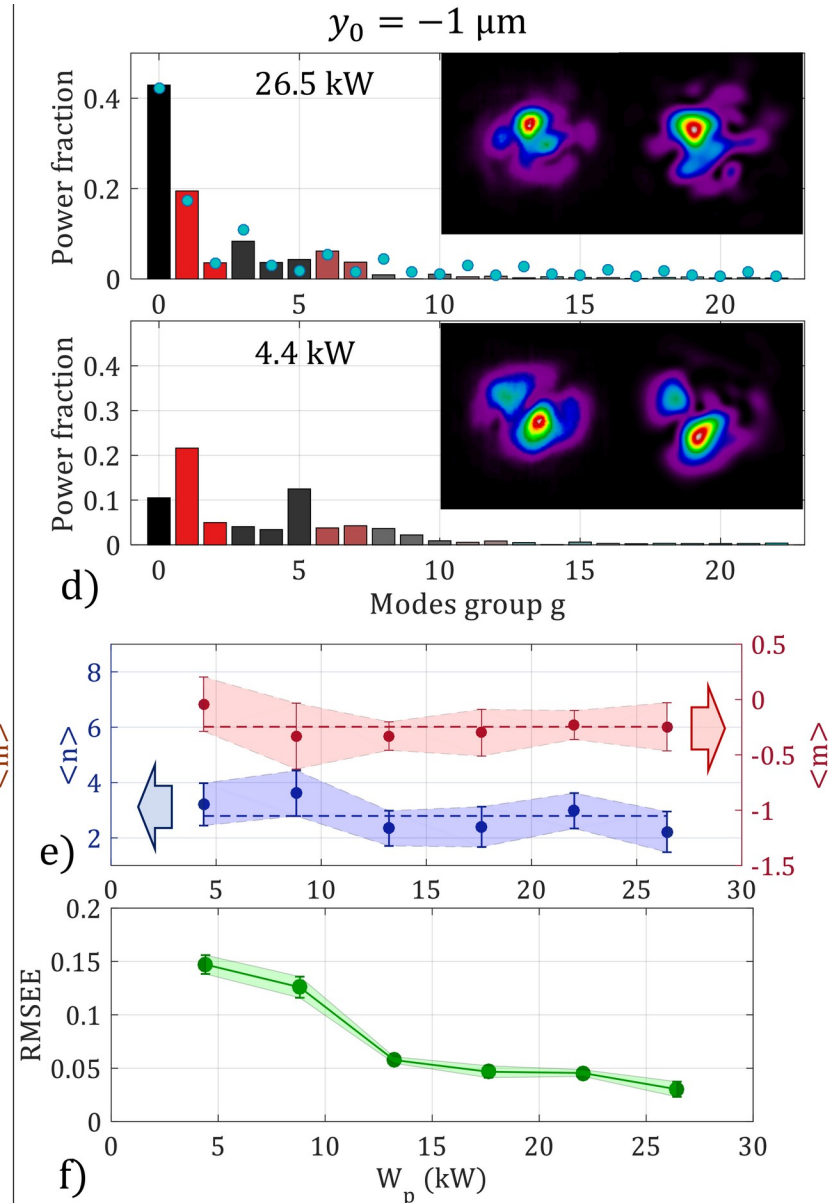
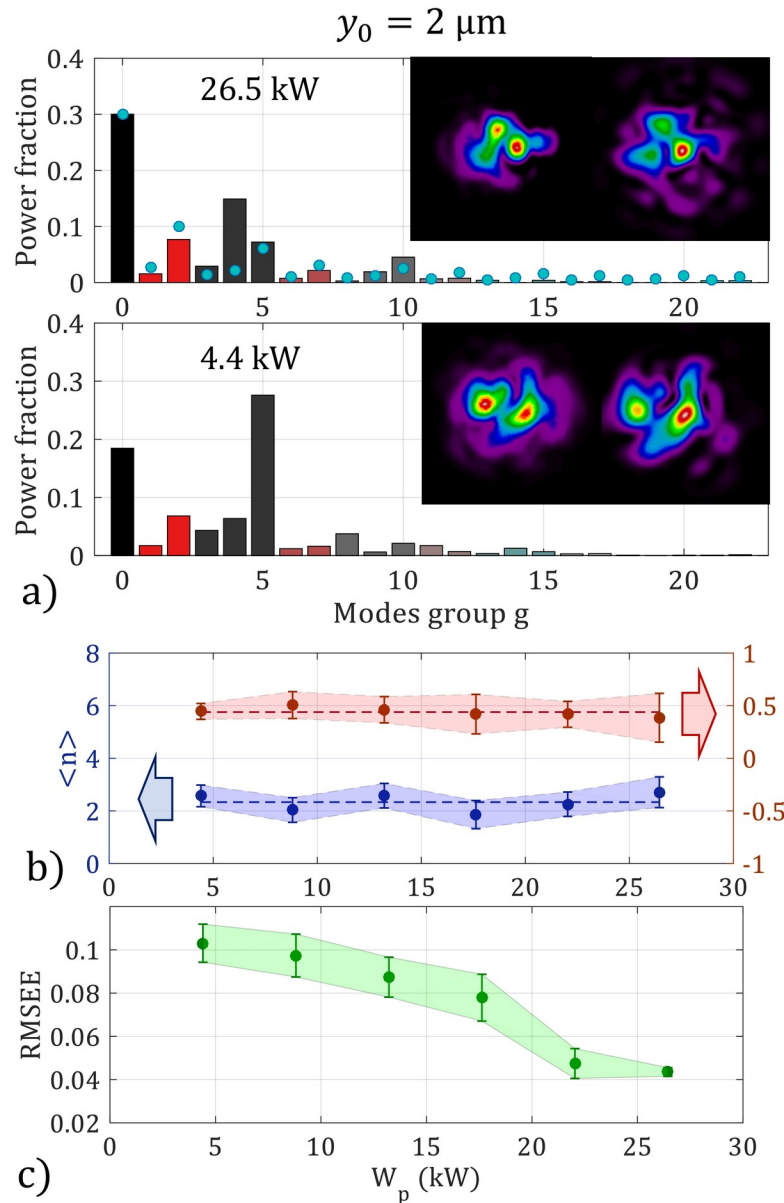
Полный момент в ОАМ-базисе:

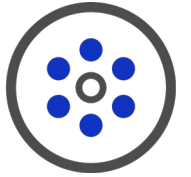
$$M = \hbar \sum_{\ell,m} m \cdot n_{\ell,m}$$





# Декомпозиция пучков с ненулевым орбитальным угловым моментом





# Главный результат

---

- Проведён анализ многомодовых (ММ) пучков, распространяющихся по световоду в режиме керровской самоочистки с **нулевым** и **ненулевым орбитальным угловым моментом**, и генерируемых в **ММ ВКР-лазере**, с помощью разработанного метода модовой декомпозиции.
- Установлено, что при увеличении мощности распределение по модам приближается к теоретически предсказанному **обобщённому распределению Рэлея-Джинса**.
- При непрерывной генерации в ММ ВКР-лазере значительная доля мощности стоксового пучка содержится в фундаментальной моде (~40%), а распределение становится экспоненциальным.
- Результаты получены благодаря использованию фазовых масок, при освещении которых ММ излучением можно получить информацию как о мощностном вкладе каждой определённой моды, так и о её фазе.

**Спасибо за внимание!**

---