



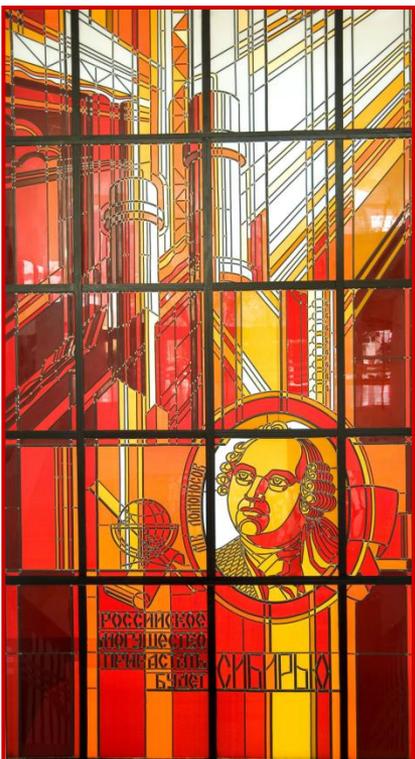
ВИХРЕВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПУЧКИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

ИЛИ

КУДРЯВЫЙ СВЕТ

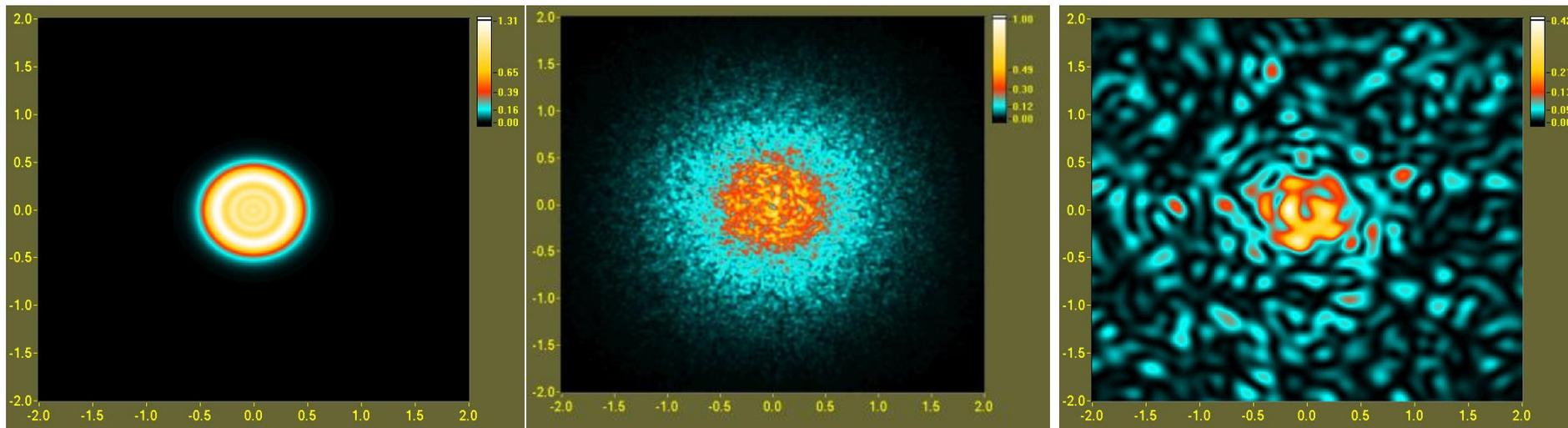
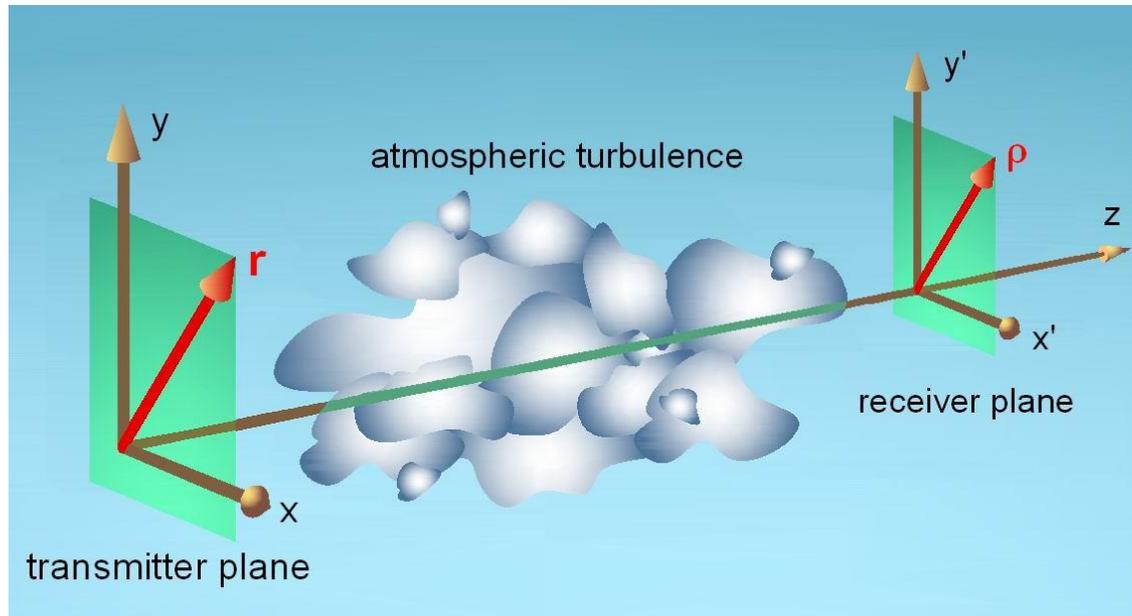
В.П. Аксёнов, О.В. Тихомирова

science@iao.ru



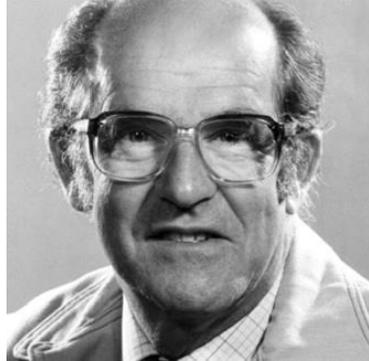
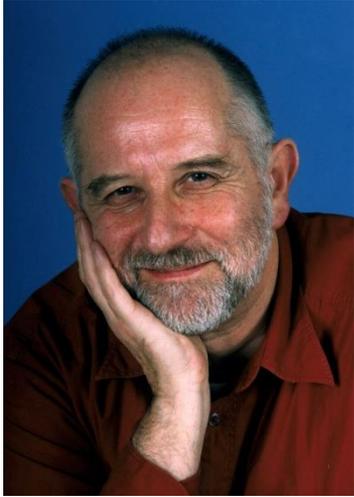
ИНСТИТУТ
ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
ИМ. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

Распространение лазерного пучка в атмосфере



Изменение распределения интенсивности пучка при распространении

СИНГУЛЯРНАЯ ОПТИКА: Much Ado About Nothing



Berry M.V. и Nye J.F. предложили концепцию дислокаций волнового фронта, исходя из подобия структуры фронта в окрестности фазовых сингулярностей дефектам кристаллической решетки в твердом теле. Dislocations in wave trains, 1974

Соскин М.С.: термин «Сингулярная оптика», 1996



Зельдович Б.Я. исследовал статистику дислокаций волнового фронта спекл-поля, препятствовавших использованию систем адаптивной оптики в турбулентной атмосфере.

Розанов Н.Н., Короленко П.В., Васнецов М.В., Ангельский О.В., Воляр А.В., Волостников В.Г., Абрамочкин Е.Г., Бекшаев А.Я., Padgett M.J., Dennis M.R., Heckenberg N.R., Torner L., Kivshar Yu.S., Лукин В.П., Фортес Б.В., Тартаковский В.А., Арсеньян Т.И., Freund I., Swartzlander G.A., Сойфер В.А., Котляр В.В. и еще многие и многие специалисты изучают фундаментальные свойства вихревых пучков, их трансформацию в процессе распространения в оптических системах, в искусственных и природных случайных и регулярных средах.

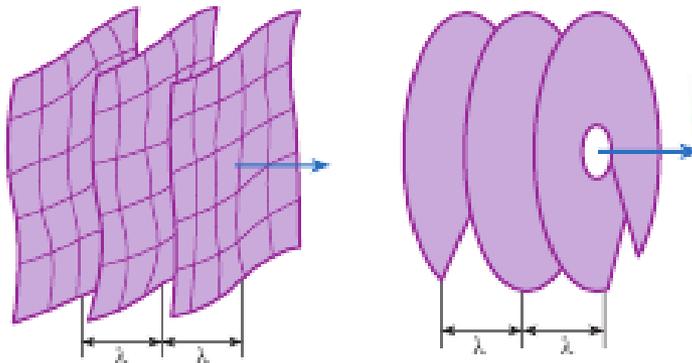
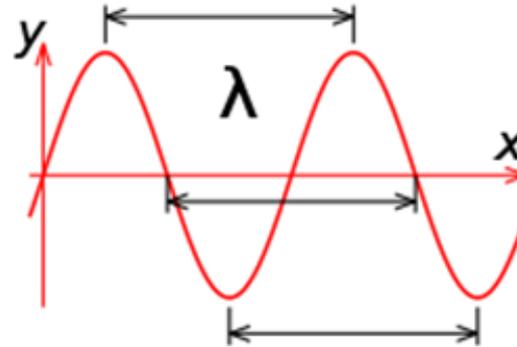
Аксёнов В.П., Brambilla M., Battipede F., Lugiato L.A., et al. предложили гидродинамическую модель вихревого распространения света.

Singularity – особенность, необычность, оригинальность, странность

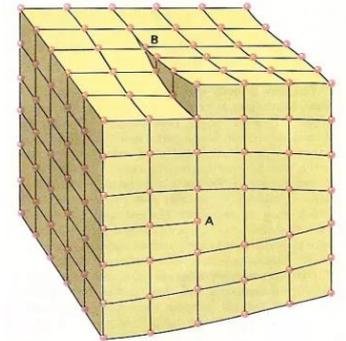
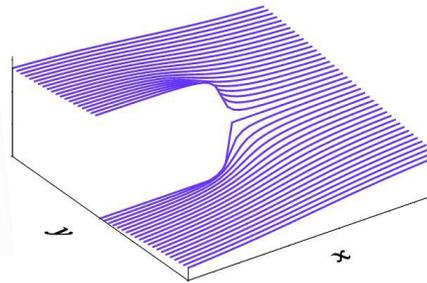
Сингулярная оптика – новая ветвь современной физической оптики, в рамках которой изучаются явления, связанные с фазовыми **сингулярностями** (дислокациями) в волновых полях, исследуются свойства оптических вихрей, физические механизмы их образования.



Волновой процесс



Структура волновых фронтов



Аналогии

Признаки оптического вихря

В световом поле $U(x, y, z) = A \exp(i S)$ существует винтовая дислокация волнового фронта (оптический вихрь) в изолированной точке $\{x_d, y_d\}$ в поперечной направлению распространения света плоскости, если в этой точке:

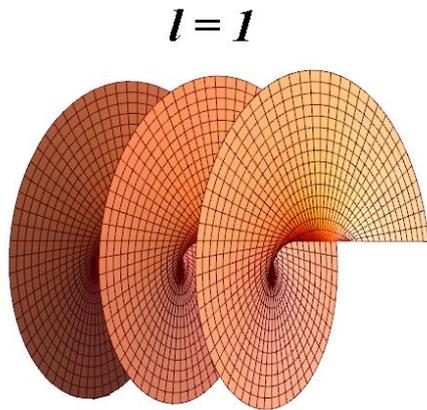
а) интенсивность поля $I(x, y, z) = (\text{Re } U)^2 + (\text{Im } U)^2 = 0$ (**nothing**);

б) фаза $S(x, y, z) = \text{Arctg}(\text{Im } U / \text{Re } U) \pm 2\pi l$ не определена;

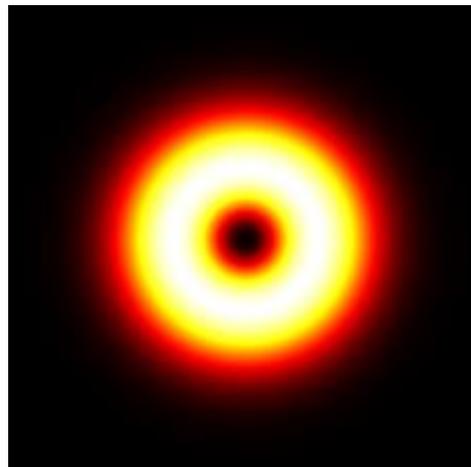
в) интегрирование градиента фазы $\nabla_{\perp} S(x, y, z)$ по замкнутому контуру Γ , окружающему такую точку, дает отличную от нуля циркуляцию

$$\oint_{\Gamma} \nabla_{\perp} S \, d\rho = 2\pi l,$$

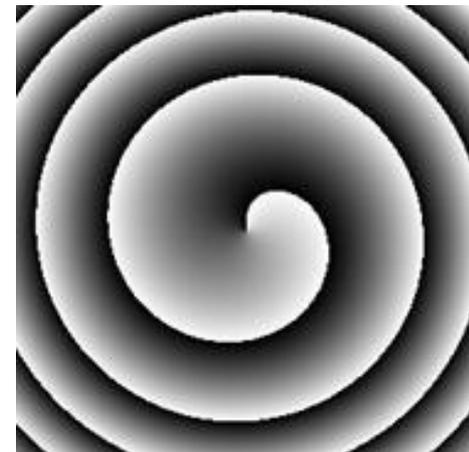
где $d\rho$ – элемент контура Γ , l – положительное или отрицательное целое число, называемое топологическим зарядом.



волновой фронт

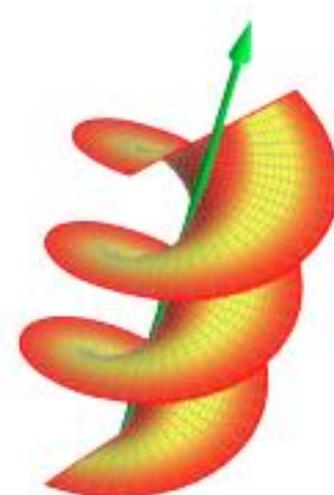
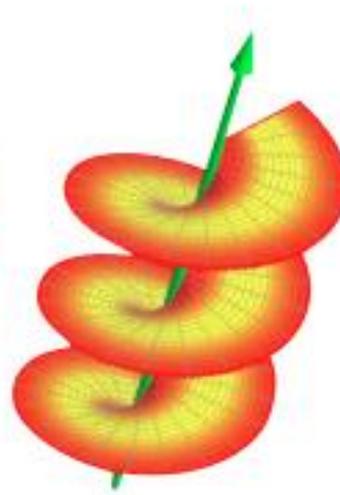
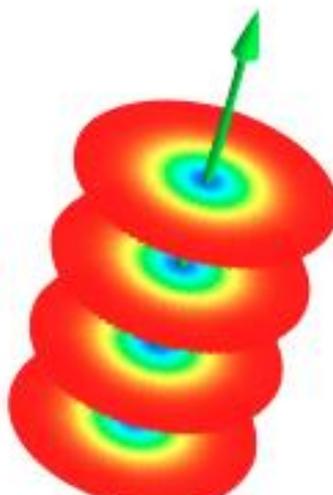
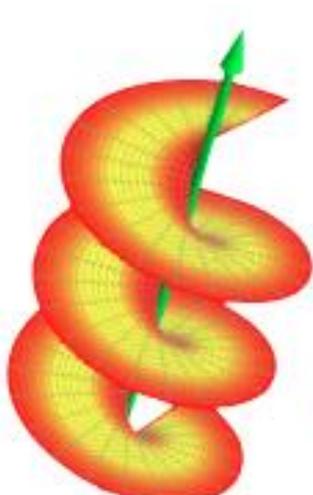
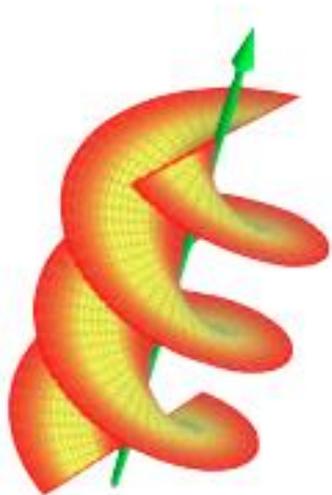
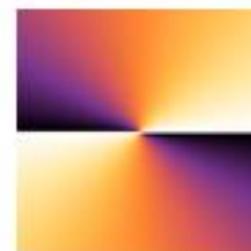
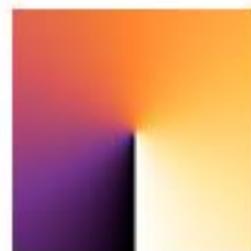
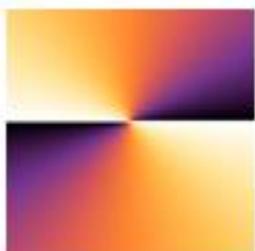
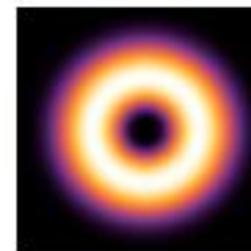
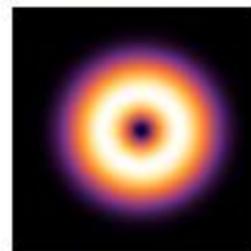
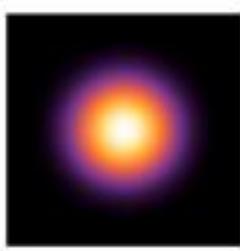
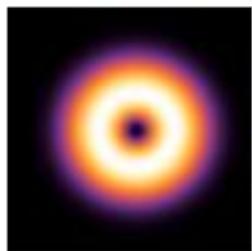
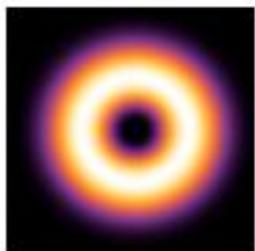


ИНТЕНСИВНОСТЬ



фаза

Оптика скрученного света



2

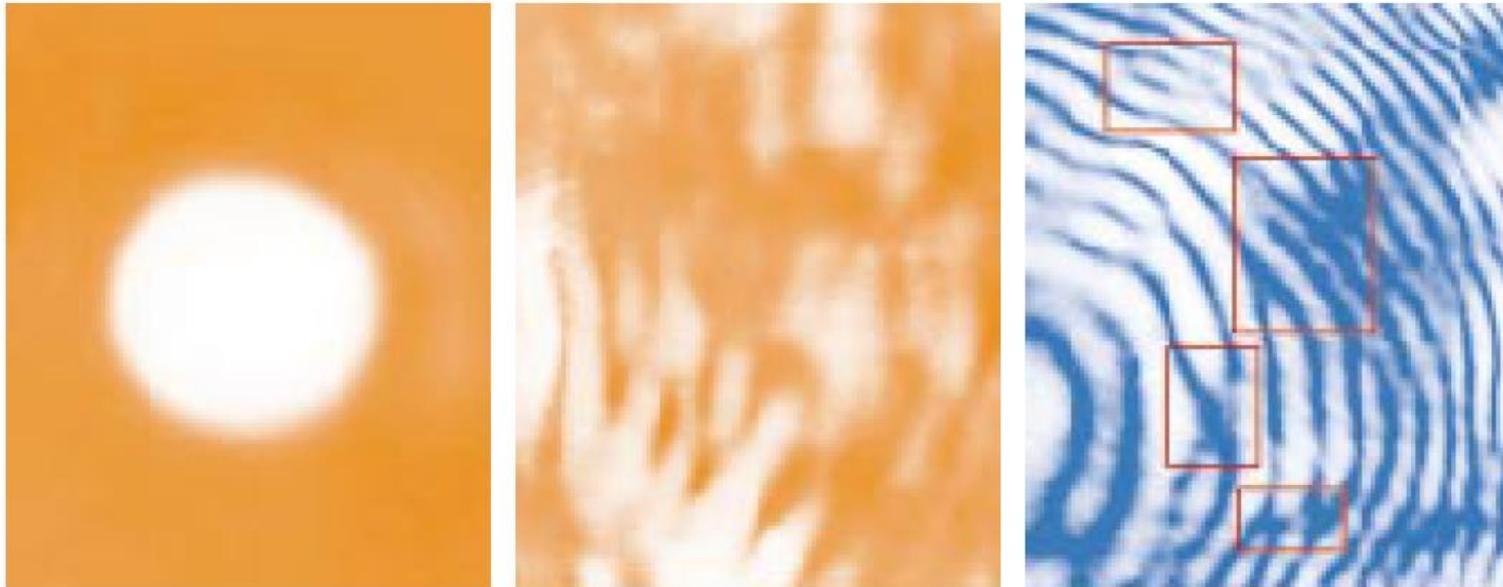
1

0

-1

-2

Интерференция

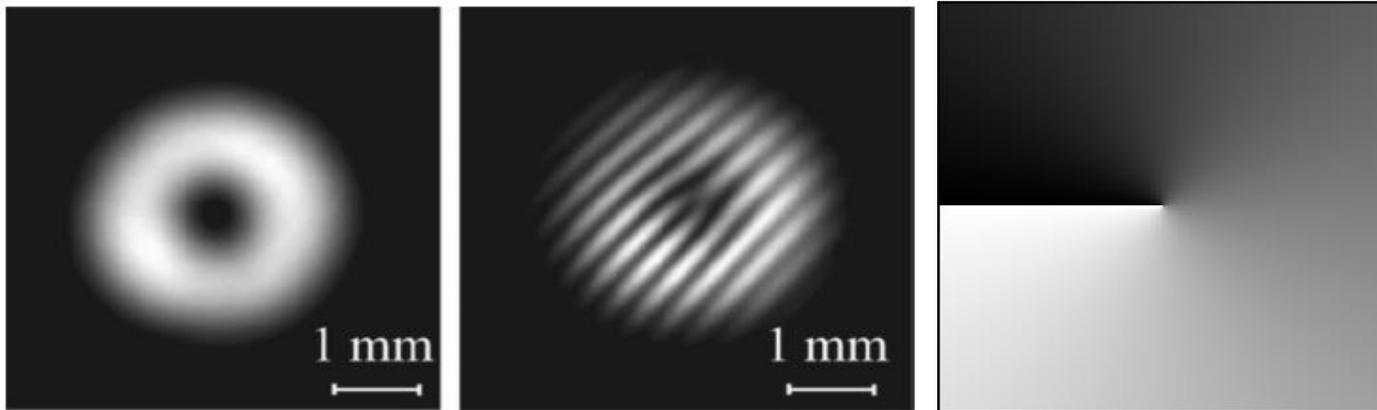


а

б

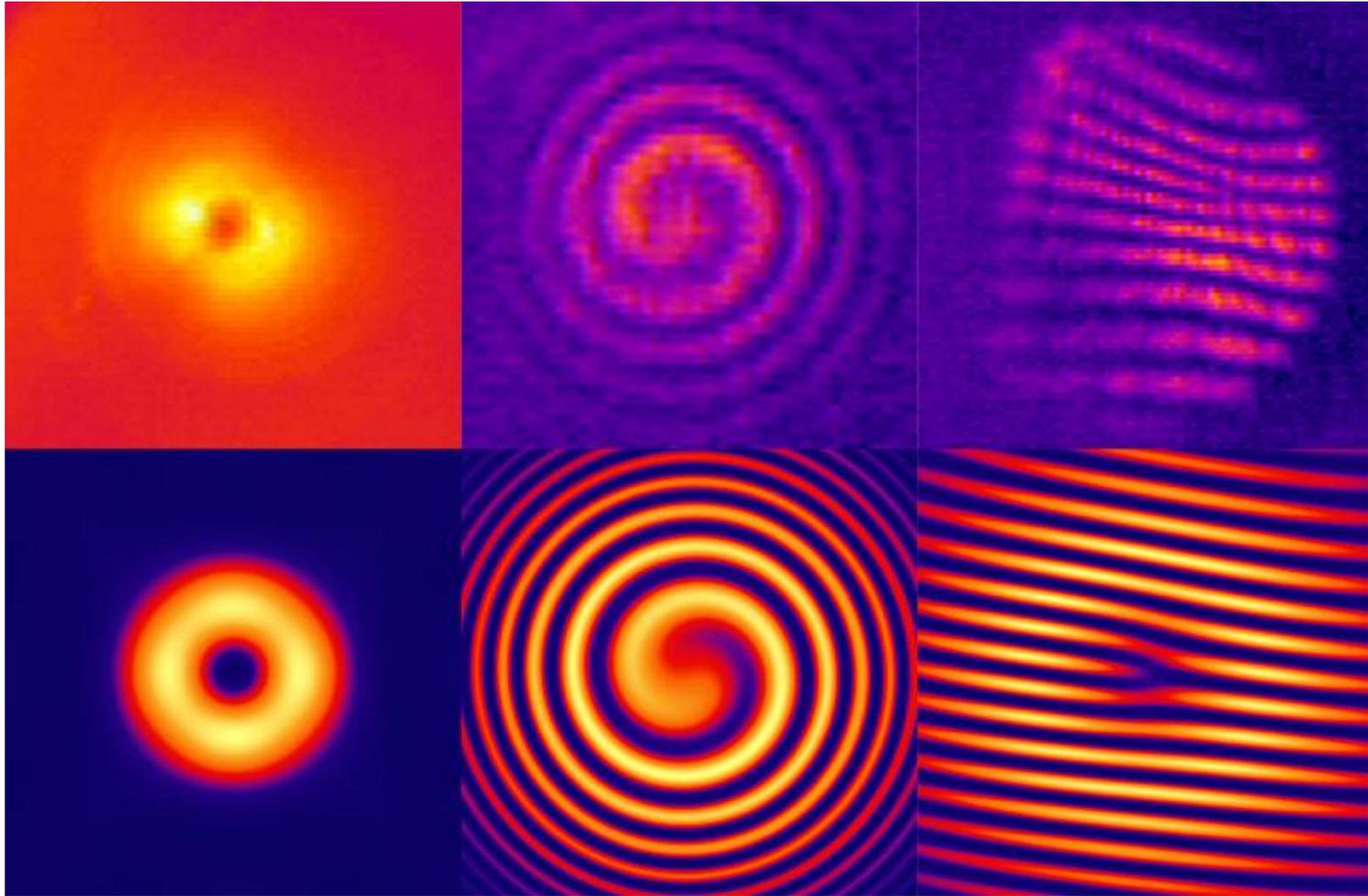
в

Фотографии (а, б) и интерферограмма (в) гауссова лазерного пучка (Короленко П.В.) :
а – исходный пучок, б, в – пучок после прохождения атмосферной трассы



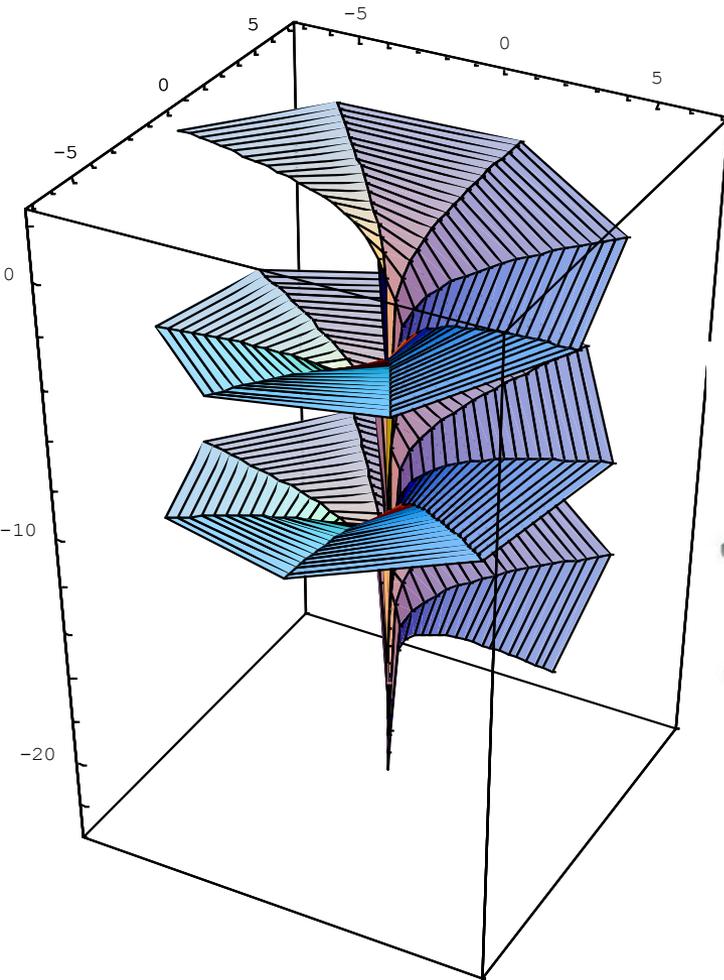
Распределение интенсивности, интерферограмма и распределение фазы
лазерного пучка с вихрем в центре (Волостников В.Г.)

Интерференция



Распределение интенсивности, фаза и интерферограмма
лазерного пучка с единичным вихрем в центре

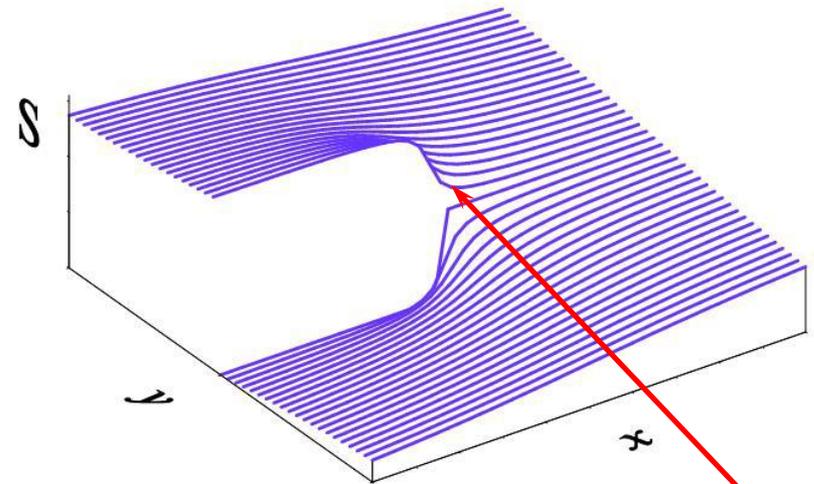
Волновой фронт и фаза вихревого пучка



Геликоид $\text{Arctg}(y/x) \pm 2\pi l$

$$U(x, y) = A \exp(i S) = x + i y$$

$$I = A^2 = x^2 + y^2, \quad S = \text{Arctg}(y/x) \pm 2\pi l$$



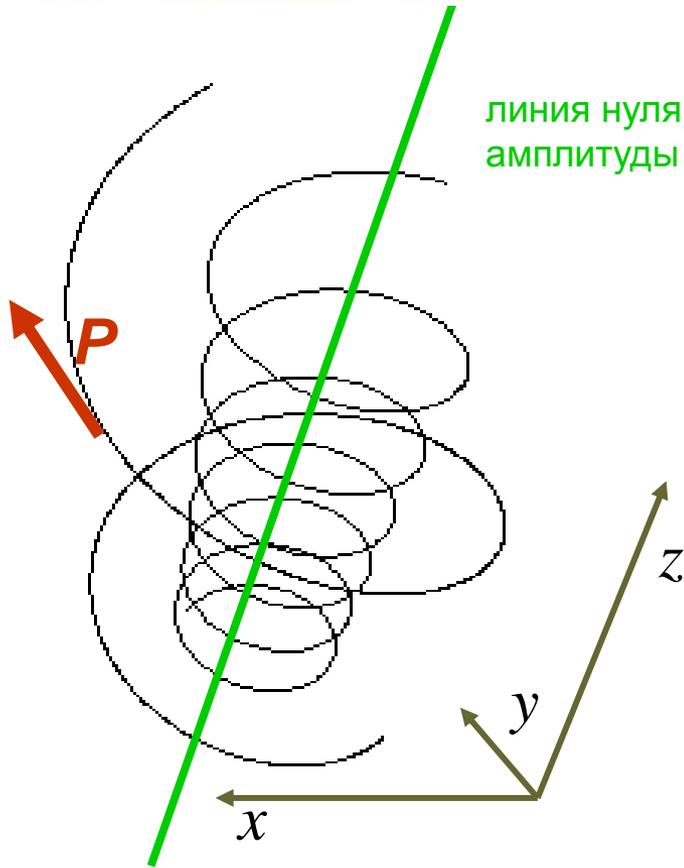
Сингулярная фаза $S(x, y) = \text{Arctg}(y/x)$
с точкой ветвления $\{x_d, y_d\}$

Линии тока энергии

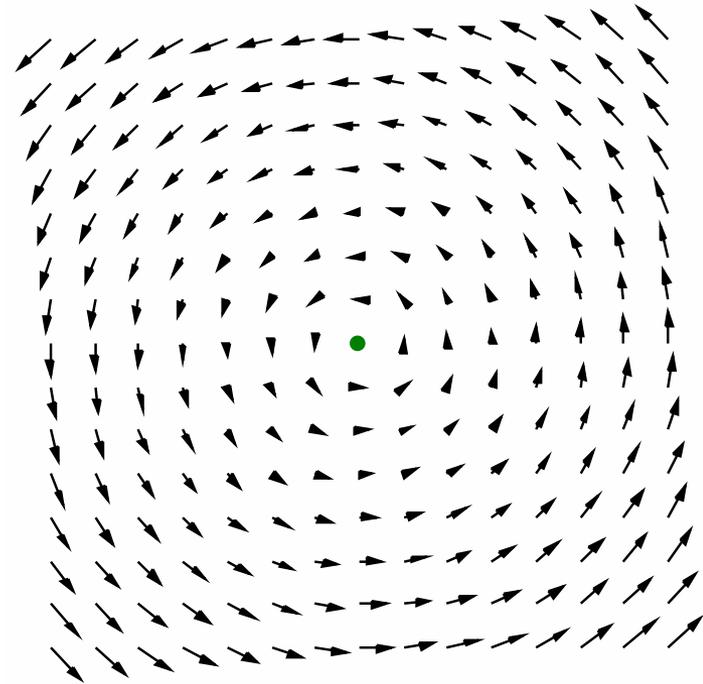
Вектор Умова-Пойнтинга $P(\rho, z)$, $P_{\perp} = I(\rho, z) \nabla_{\perp} S(\rho, z)$, $P_z = kl$, описывает плотность и направление течения энергии в световом пучке

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{P_{\perp}(\rho, z)}{P_z(\rho, z)} = \frac{1}{k} \nabla_{\perp} S(\rho, z)$$

$\rho(z) = \{x(z), y(z)\}$ текущая поперечная координата линии тока



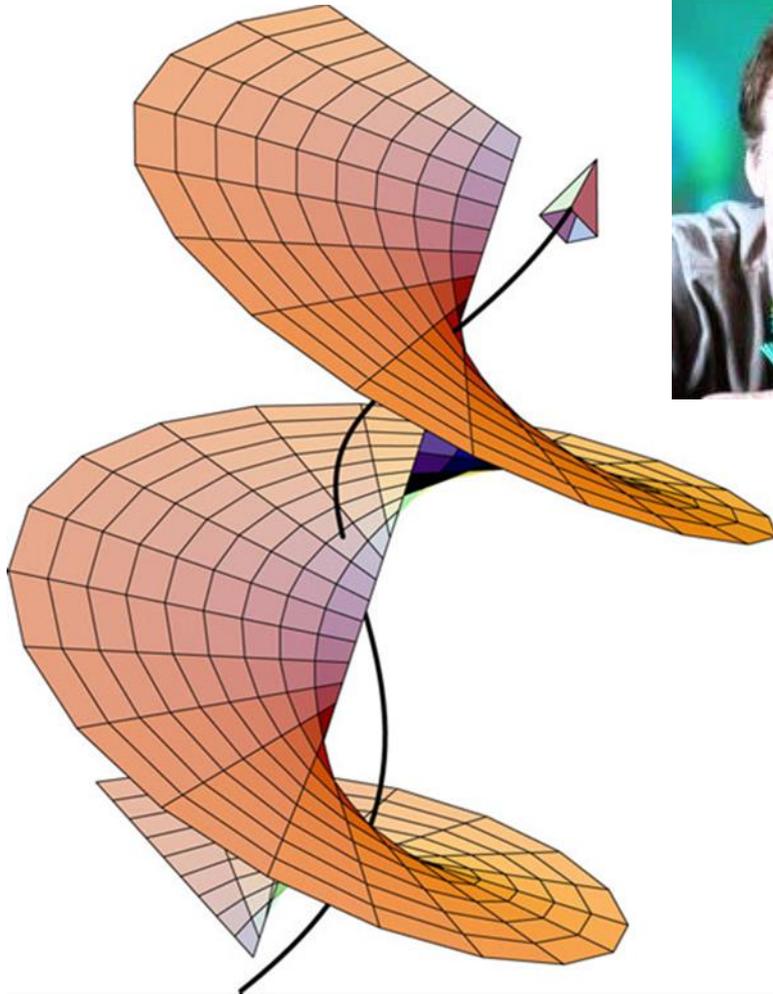
Линии тока в окрестности одиночной дислокации



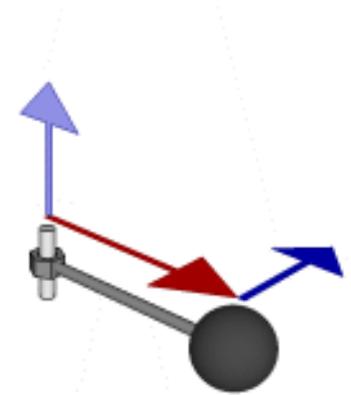
Поле вектора P_{\perp}

Орбитальный угловой момент

Световой пучок с винтовым фазовым фронтом, описываемым поперечной фазовой структурой $\exp(i l \phi)$, несет орбитальный угловой момент, равный $l \hbar$ на фотон.



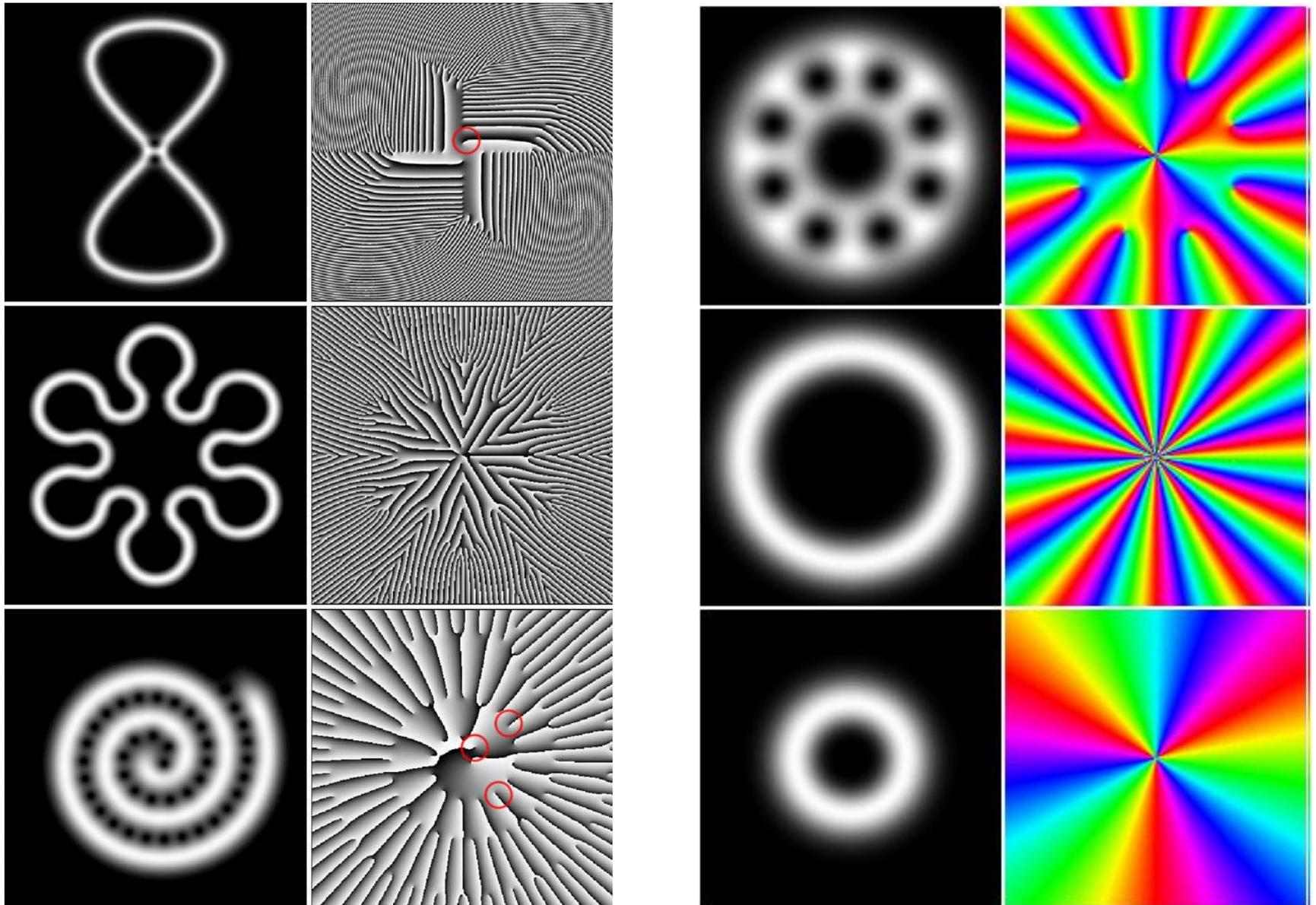
$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau} &= \mathbf{r} \times \mathbf{F} \\ \mathbf{L} &= \mathbf{r} \times \mathbf{p}\end{aligned}$$



Miles J. Padgett, Alison M. Yao. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications. *Advances in Optics and Photonics* 3, 161–204 (2011).

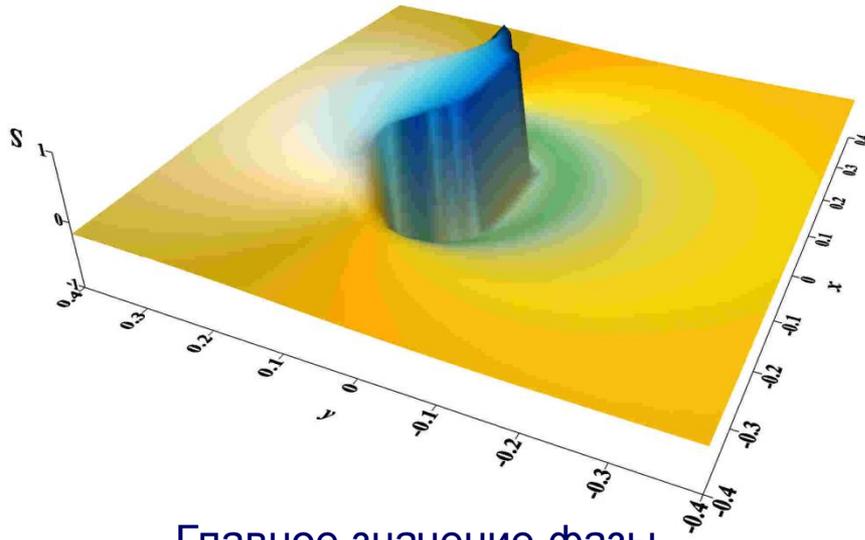
L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman. *Phys. Rev. A* 45, 8185–8189 (1992).

Вихревые пучки

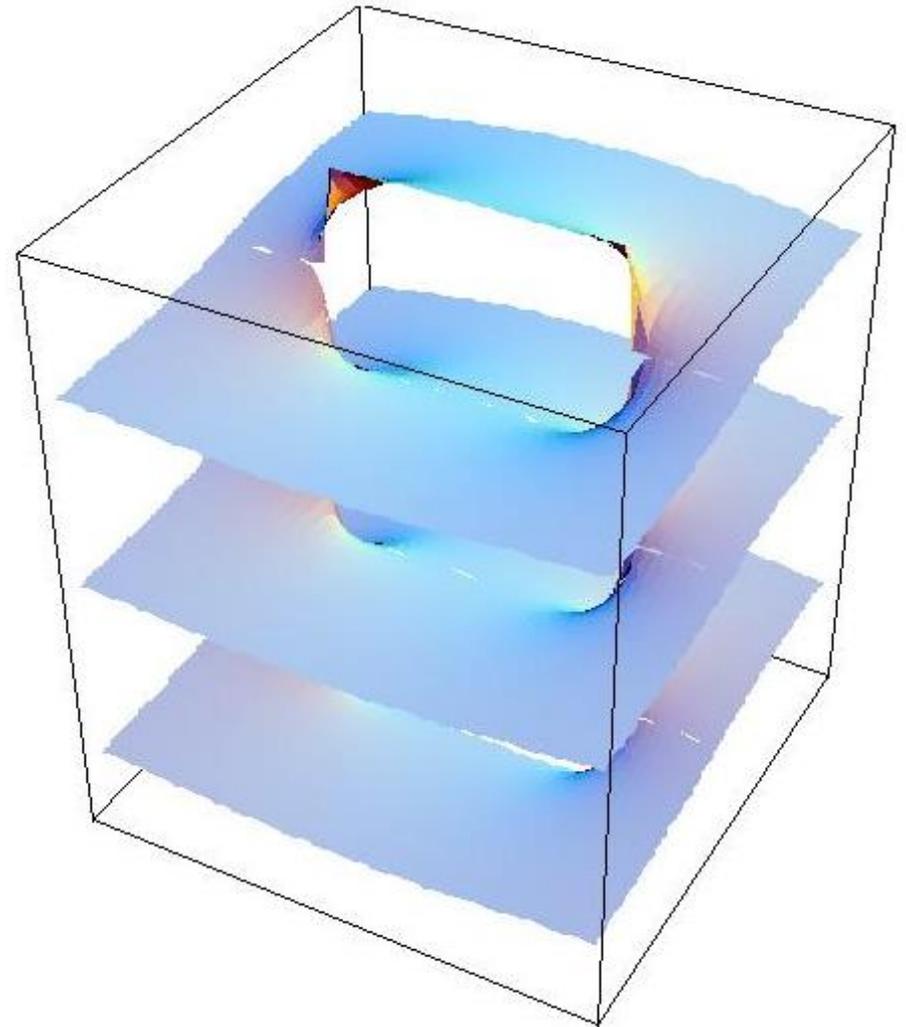
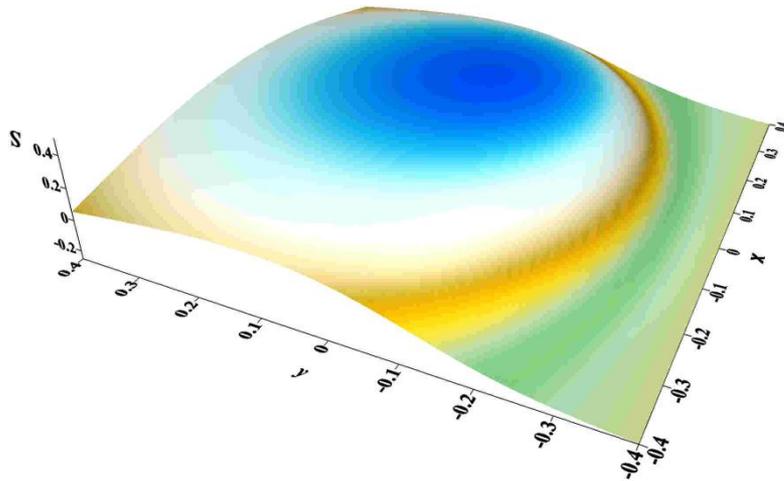


Вихревой диполь

$$U(x, y) = (x - 1 + i y) (x + 1 - i y) \exp[-(x^2 + y^2)/2]$$

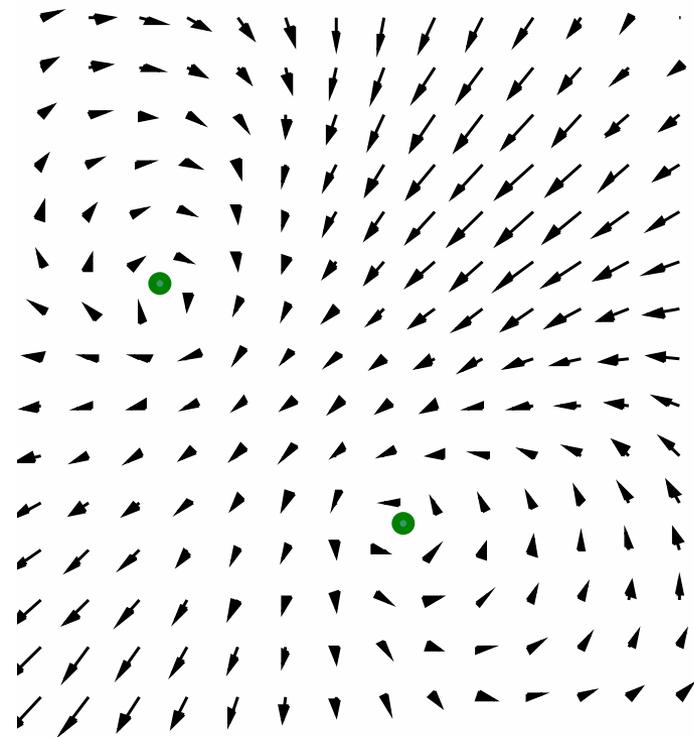
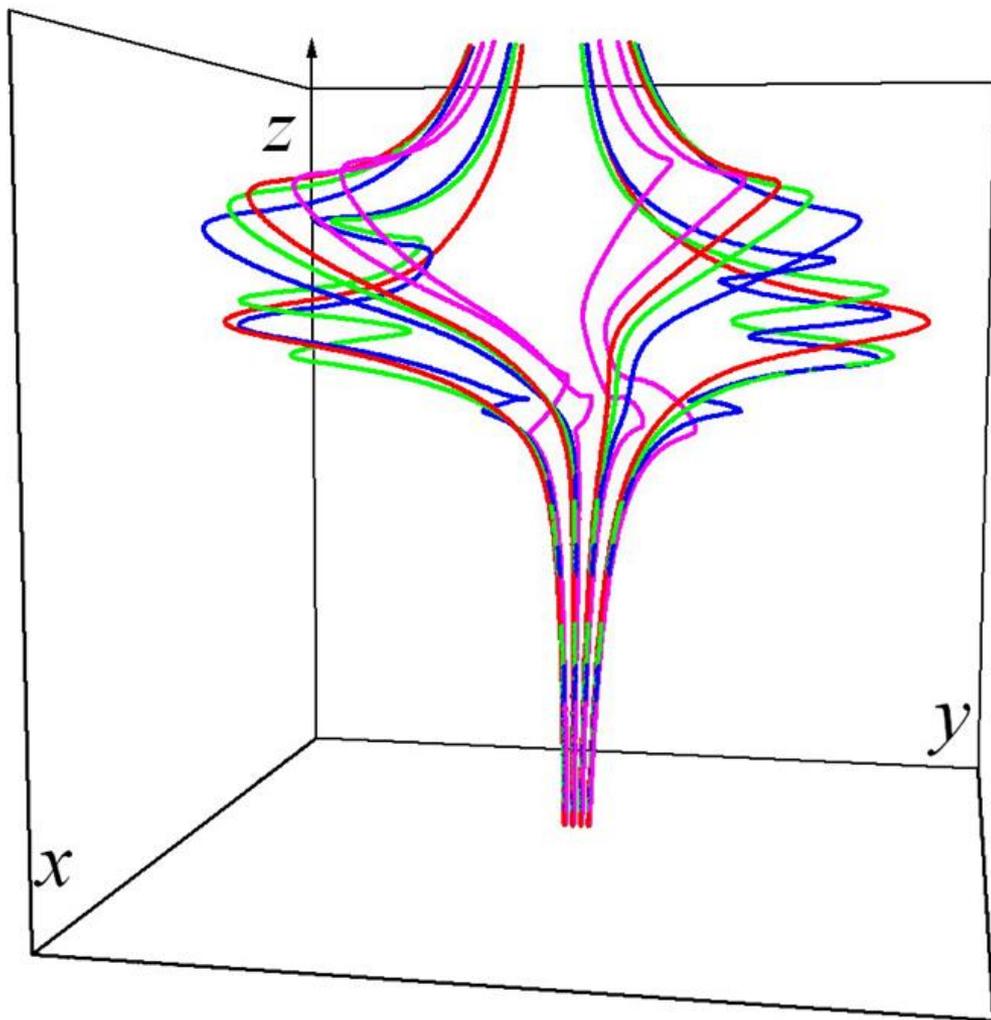


Главное значение фазы
 $S(x, y) = \text{Arg} [U(x, y)]$

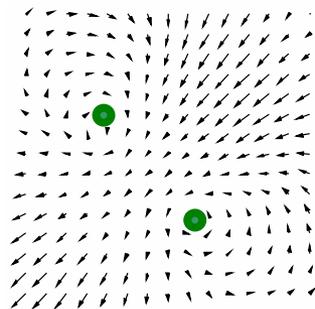
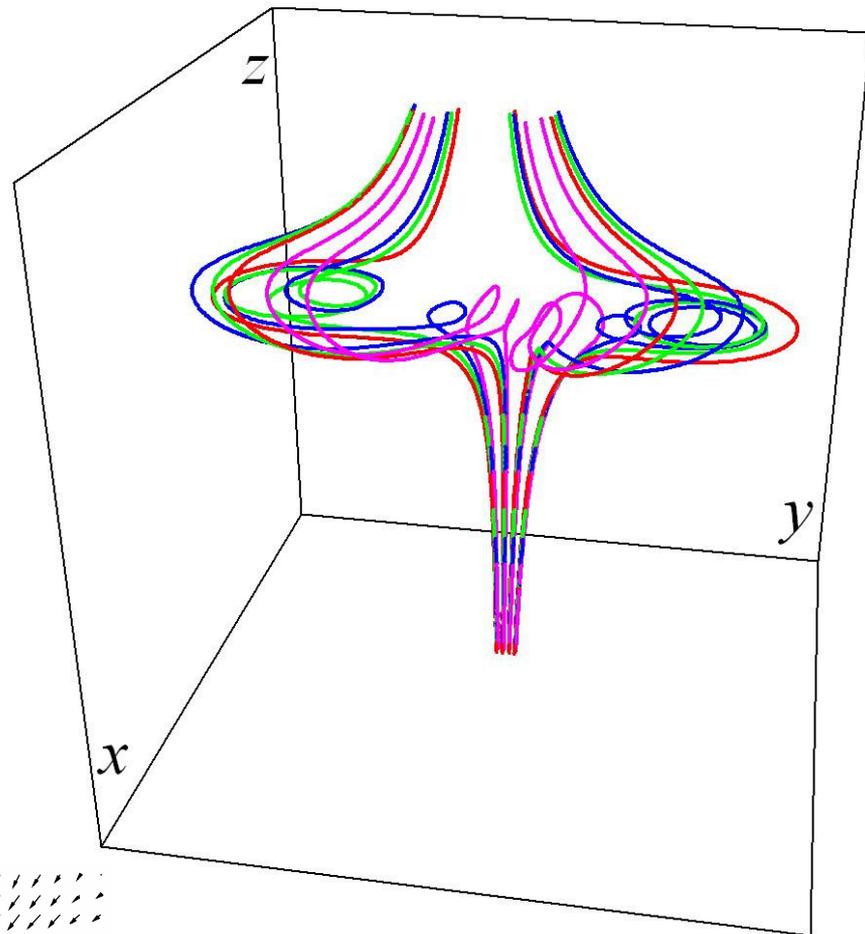
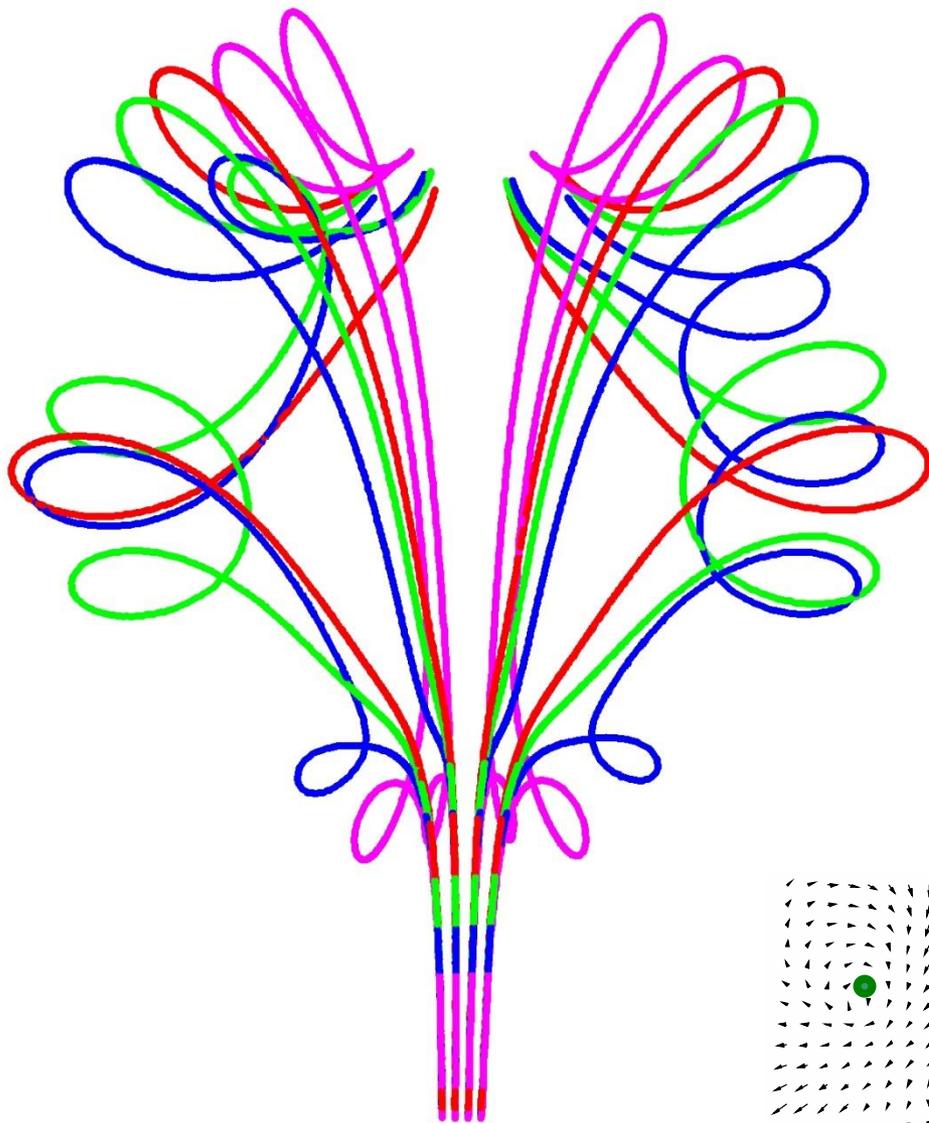


Фаза $S(x, y) = \text{Arg} [U(x, y)] \pm 2 \pi l$
в области существования диполя

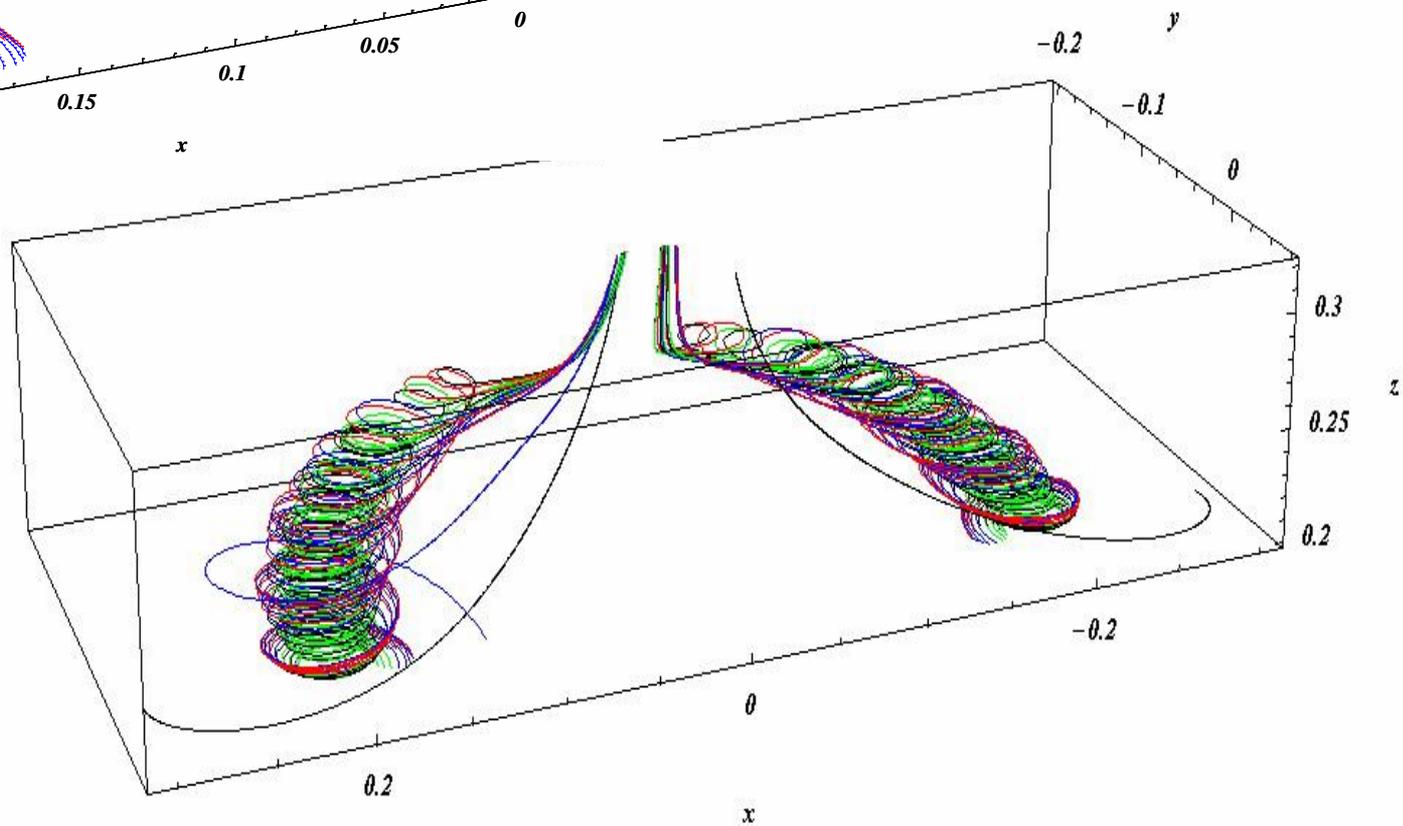
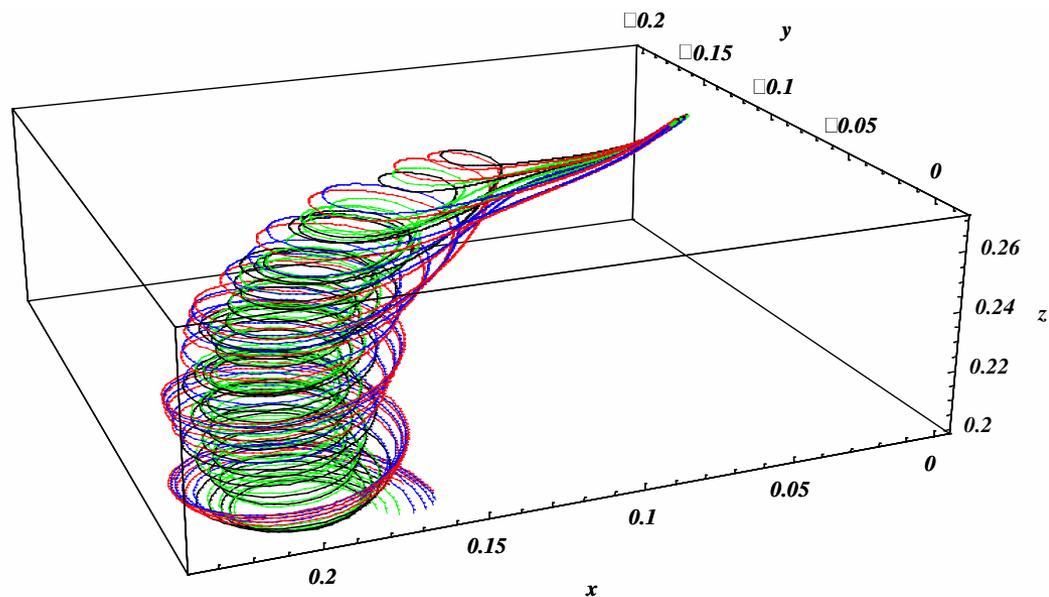
Линии тока в области вихревого диполя



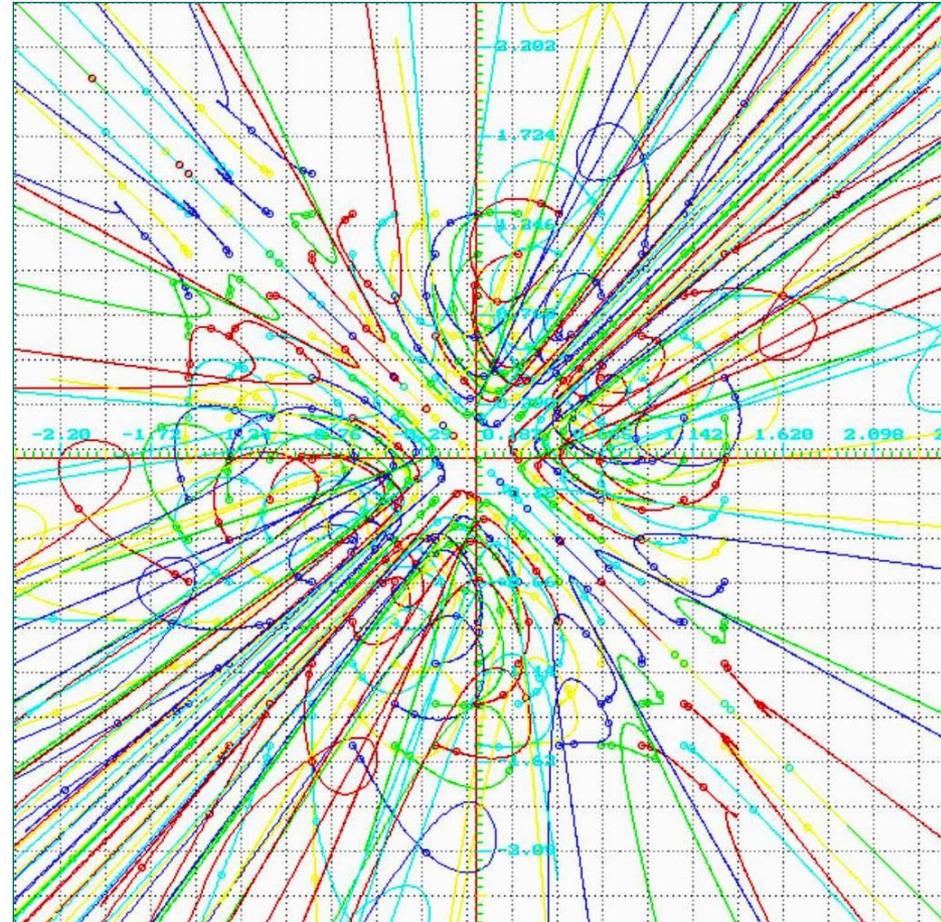
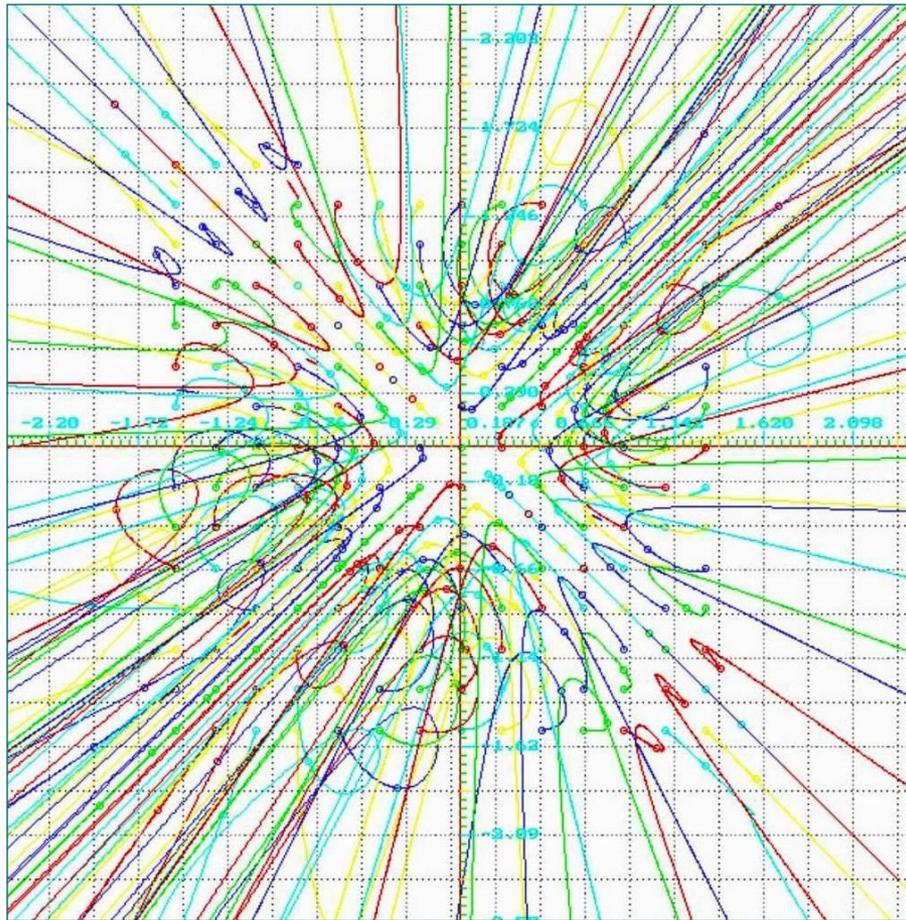
Линии тока в области вихревого диполя



Лучевые трубки в области вихревого диполя

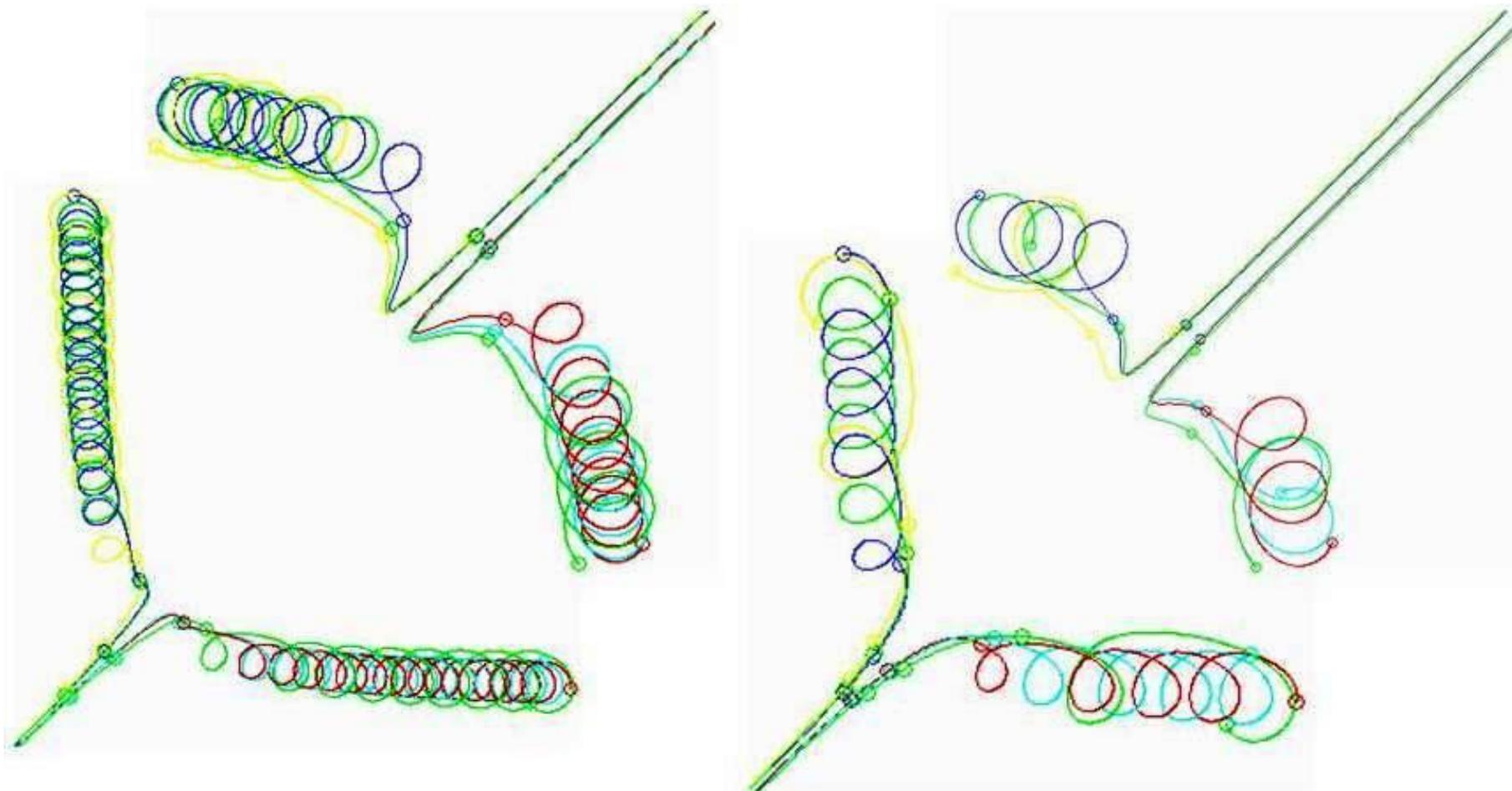


Линии тока энергии в области вихревого квадрупольа



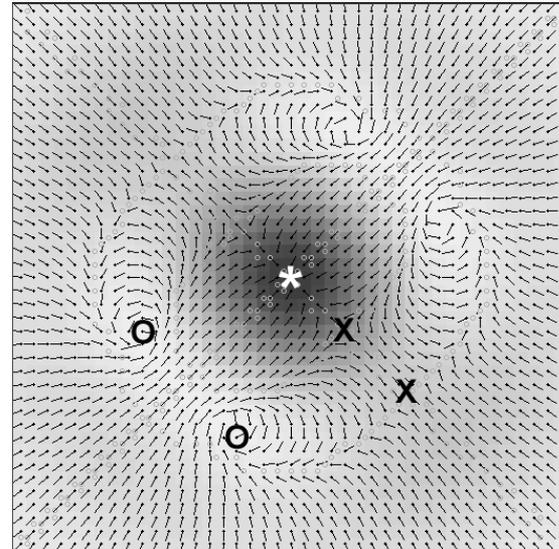
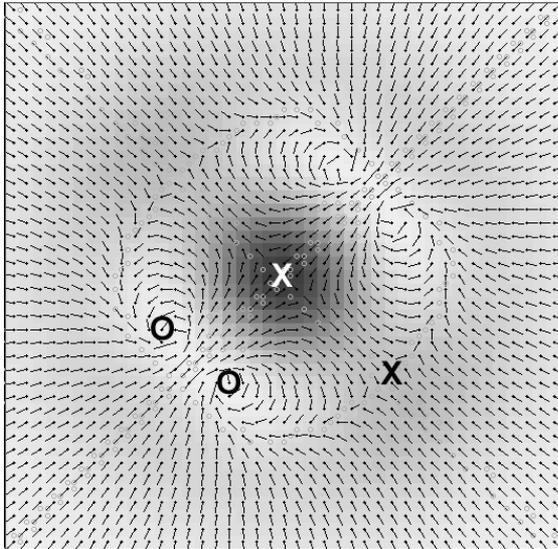
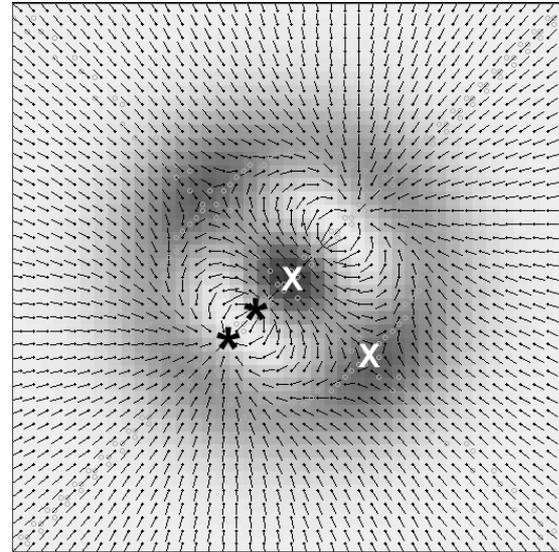
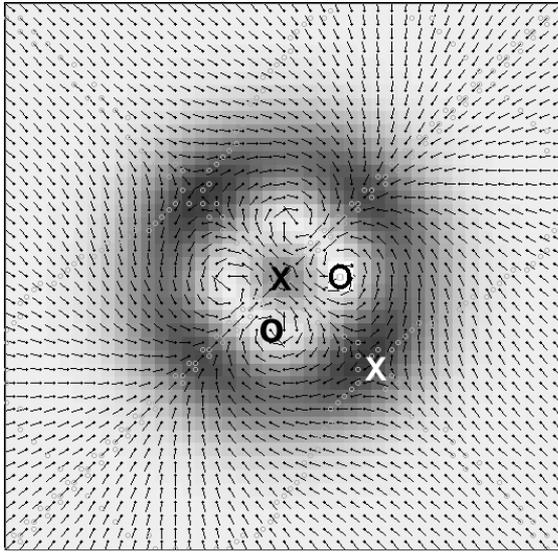
Проекции линий тока энергии на поперечную плоскость $\{x, y\}$ при возникновении и аннигиляции оптических вихрей, пучок Лагерра-Гаусса

Линии тока энергии в области вихревого квадрупольа



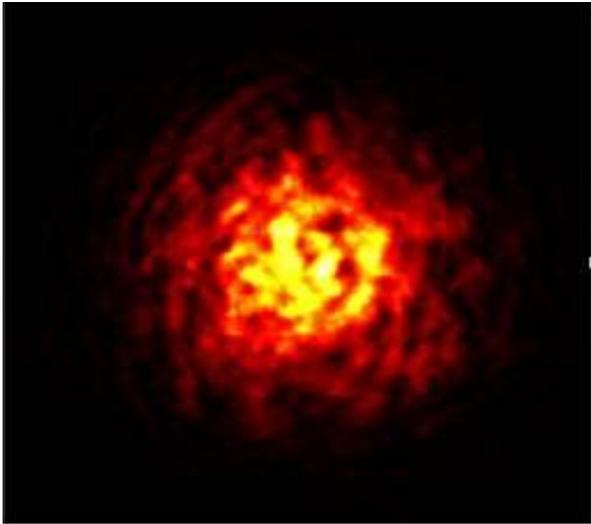
Проекции линий тока энергии на поперечную плоскость $\{x, y\}$ при возникновении и аннигиляции оптических вихрей, пучок Лагерра-Гаусса

Вихревой квадруполь

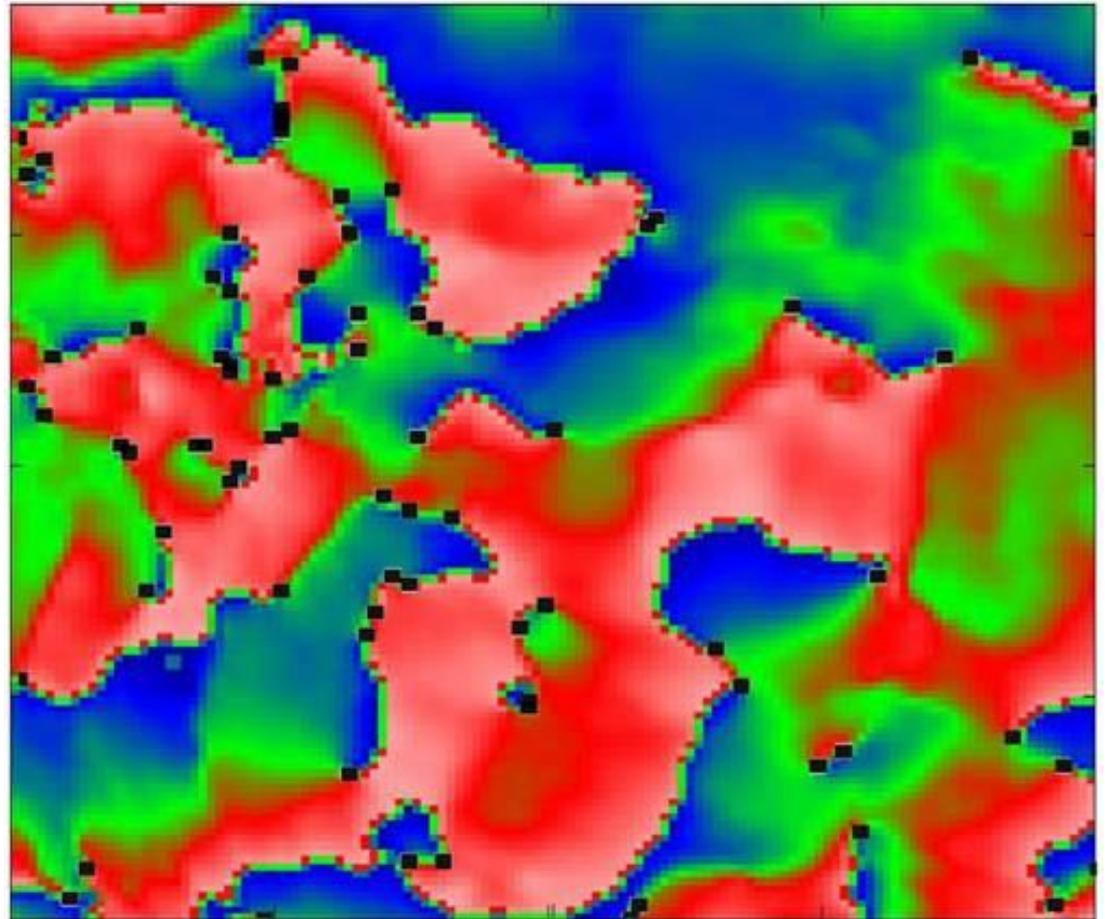
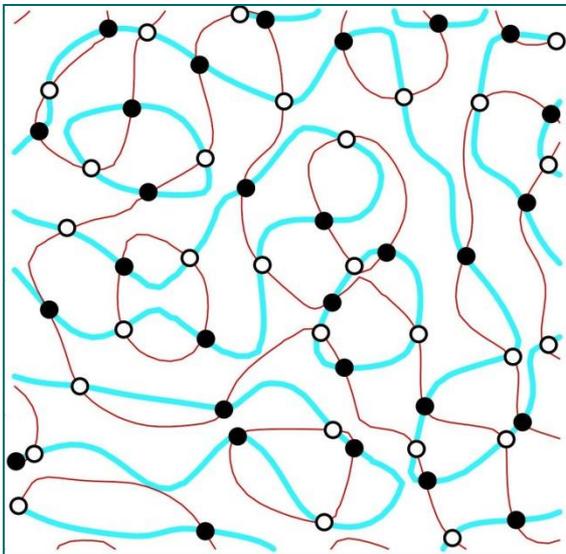


Распределение интенсивности и поле направлений линий тока энергии в поперечной плоскости: седло x , узел $*$, фокус o

Интенсивность и фаза пучка в турбулентной атмосфере

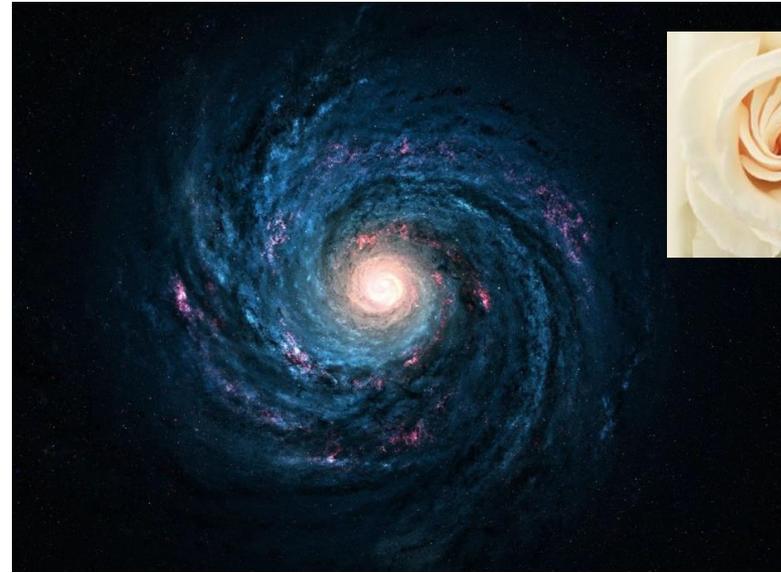


Интенсивность

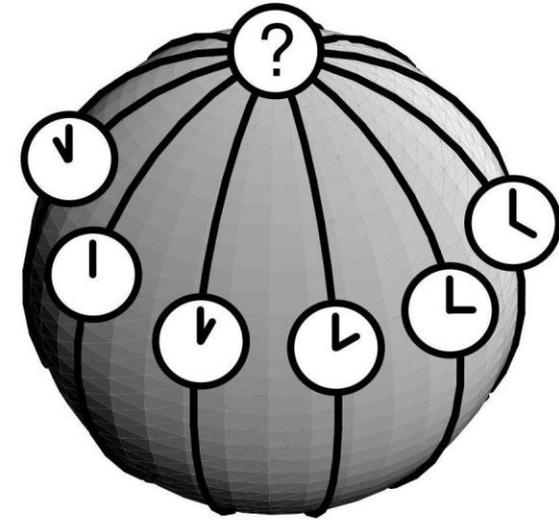


Фаза: дислокации отмечены черными квадратиками

Вихревые структуры



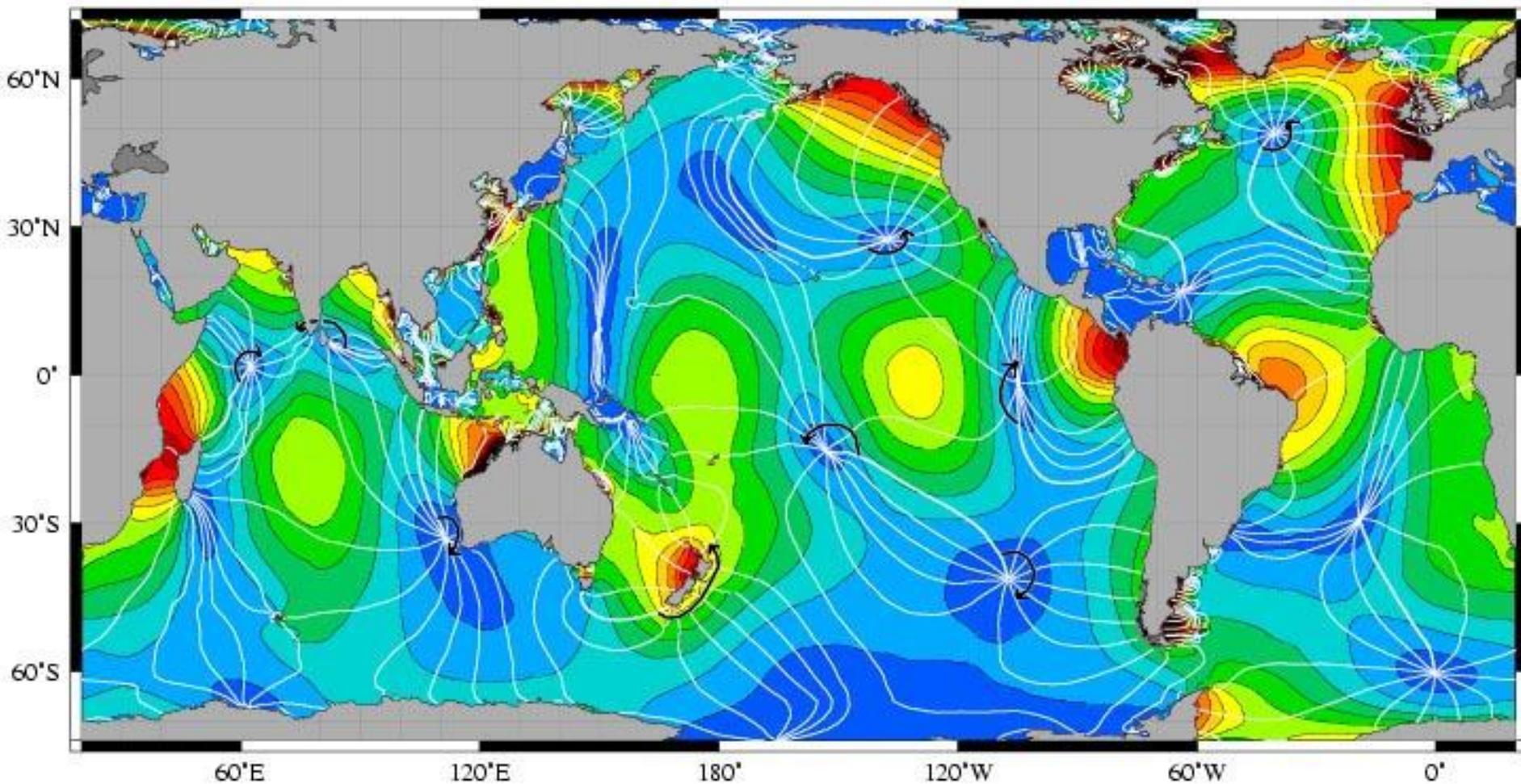
Сингулярности вокруг нас



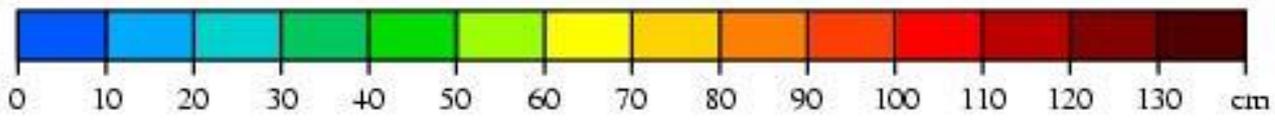
Который час на полюсе?

Котидальные линии характеризуют положение гребня приливной волны для каждого часа





R Ray
Space Geodesy Branch



Генерация вихревых лазерных пучков

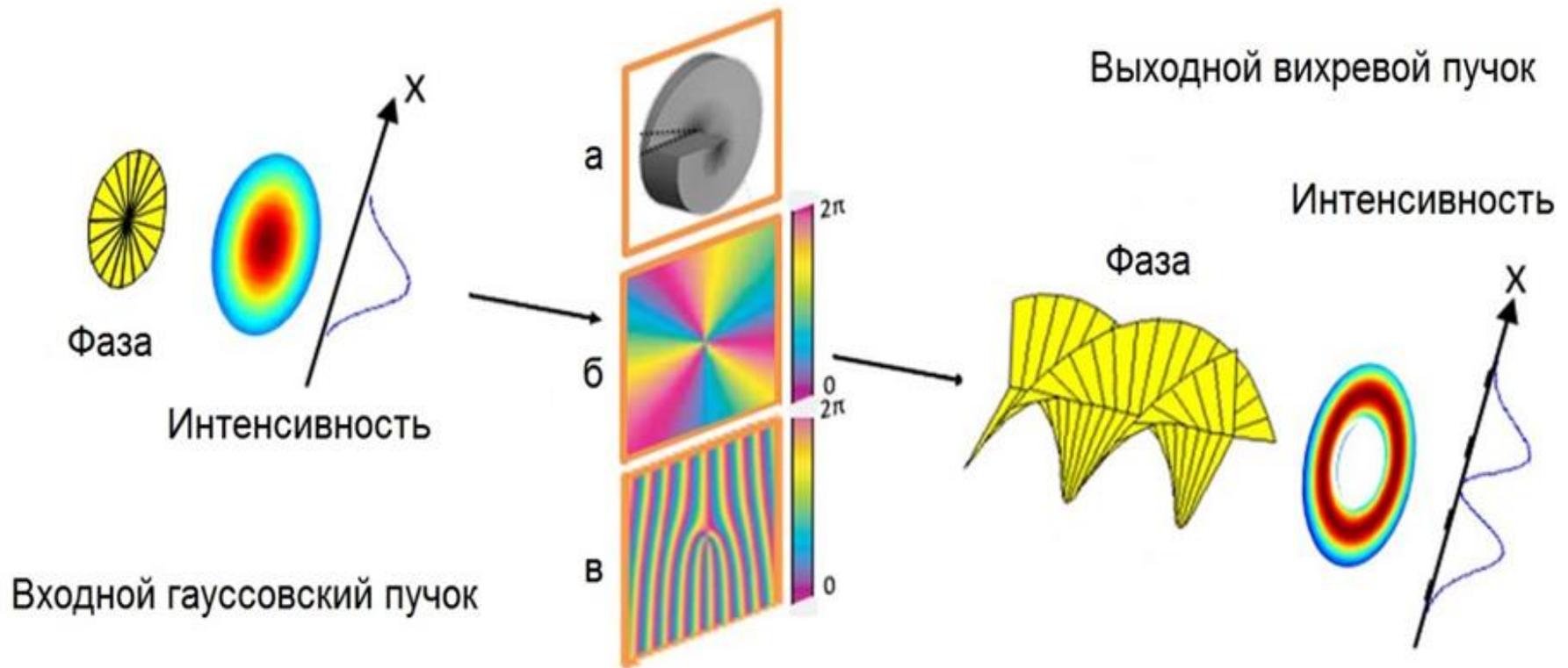
- ❖ Конвертация фундаментального гауссова пучка в вихревой пучок вне лазерного резонатора: спиральная фазовая пластинка, дифракционная фазовая голограмма, метаматериалы, пара цилиндрических линз, Q-пластинка, световодная решетка или оптоволоконный разветвитель.
- ❖ Получение вихревых пучков на выходе из лазерного резонатора.
- ❖ Когерентная комбинация безвихревых пучков.

Применения вихревых лазерных пучков

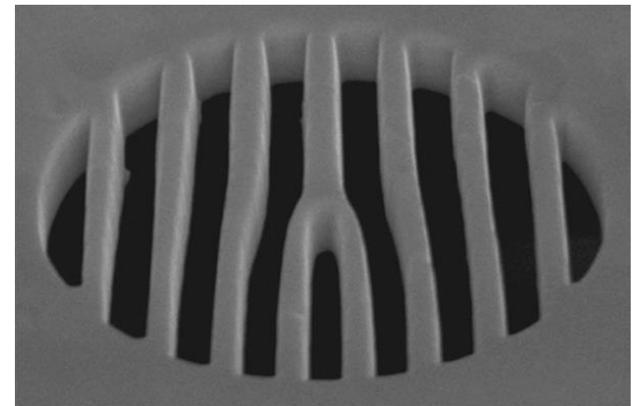
- ❖ Манипуляция микрообъектами: лазерные пинцеты и ловушки.
- ❖ Системы передачи информации по открытым, волоконным, атмосферным каналам.
- ❖ Метрология.
- ❖ Обработка материалов.

Скиданов Р.В., Рыков М.А. Компьютерная оптика, 2013, том 37, №4.
Willner A.E. et al. Advances in Optics and Photonics 7, 66 –106 (2015).
Barboza R. et al. Advances in Optics and Photonics 7, 635–683 (2015).

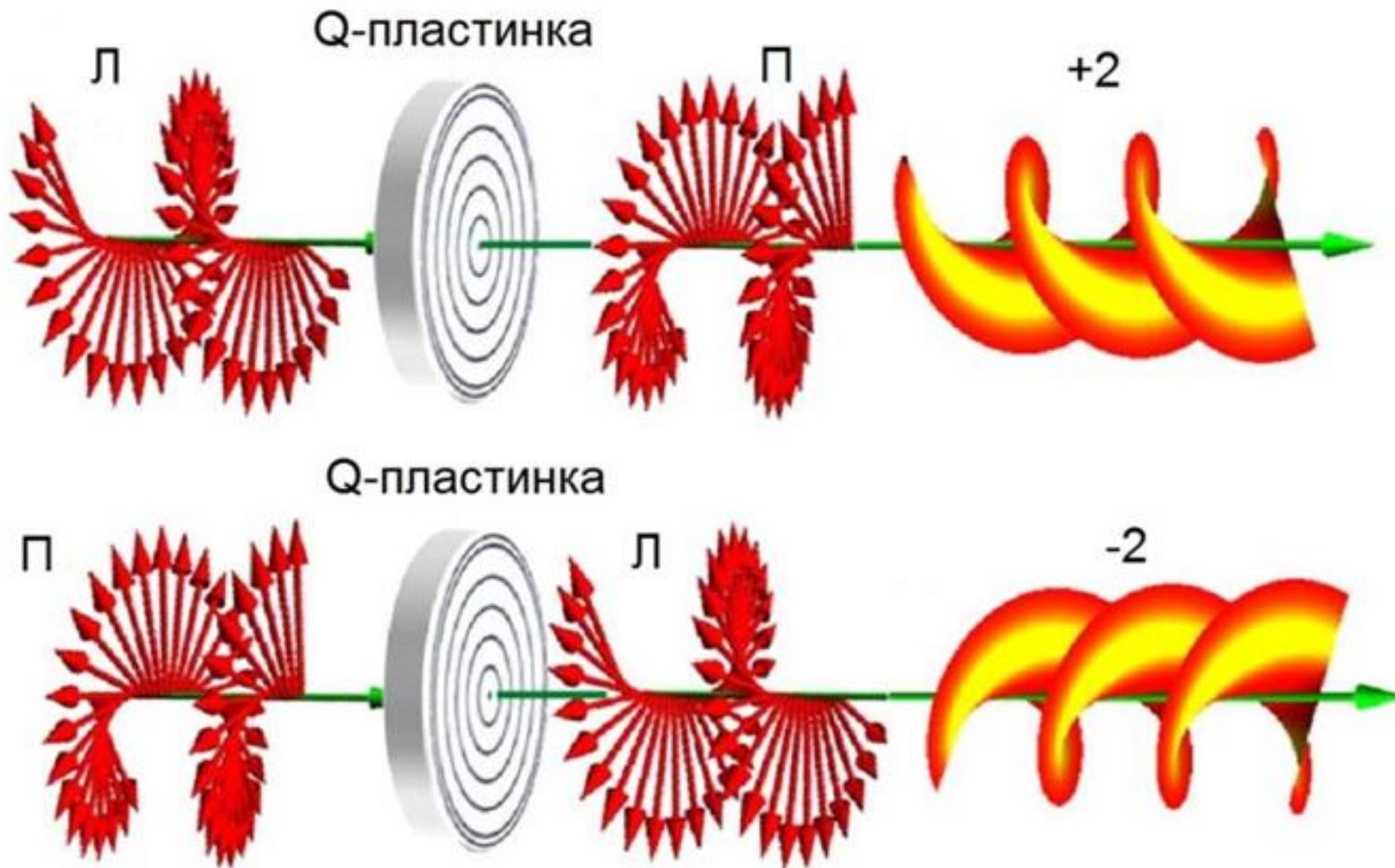
Генерация вихревых лазерных пучков



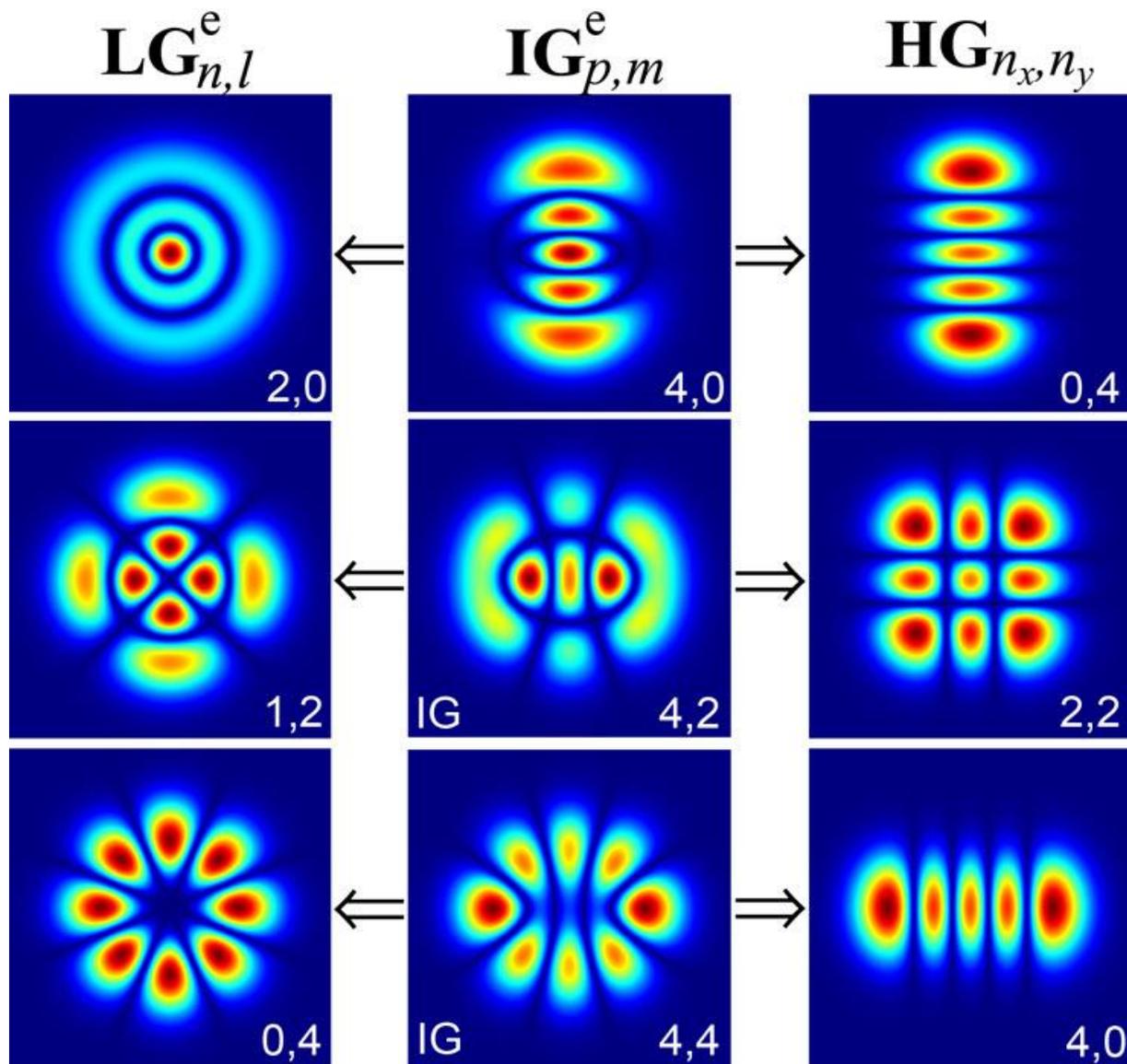
Методы конвертации: спиральная фазовая пластина (а), фазовая голограмма со спиральным фазовым распределением (б), фазовая голограмма с изображением «вилочки» (в)



Конвертация с помощью Q-пластинки

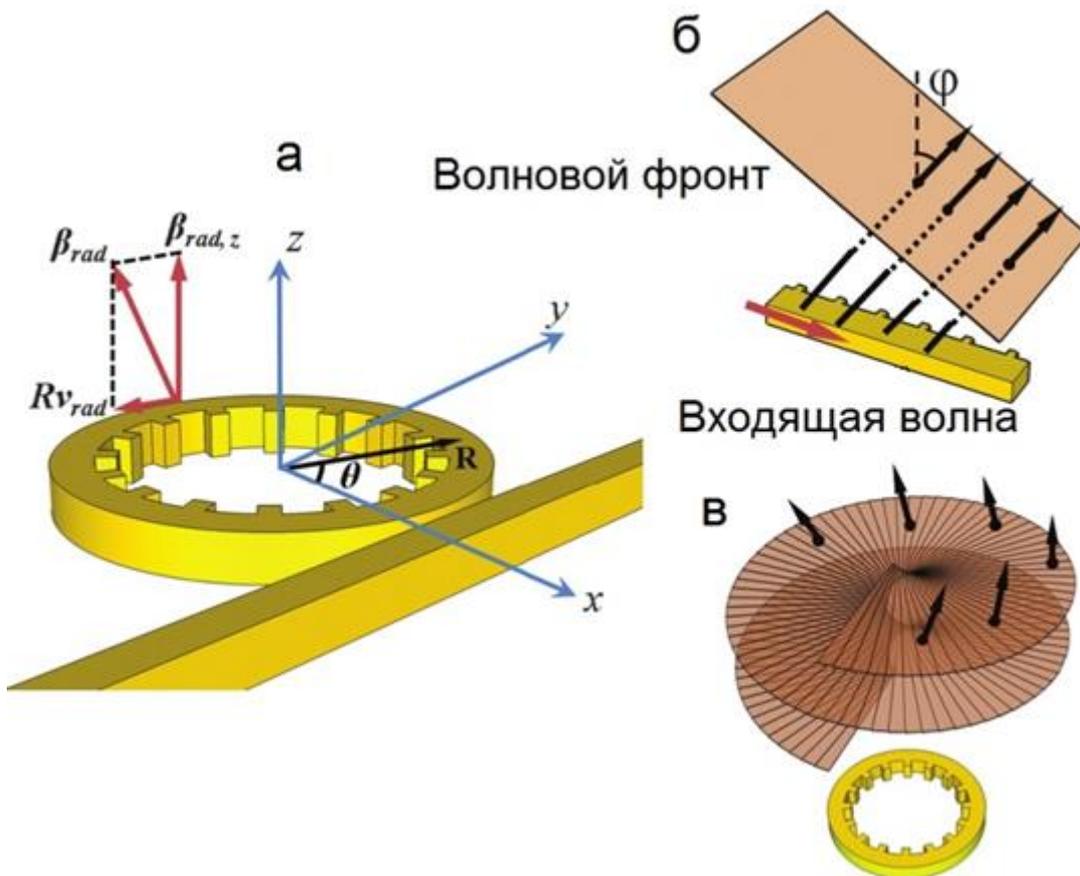
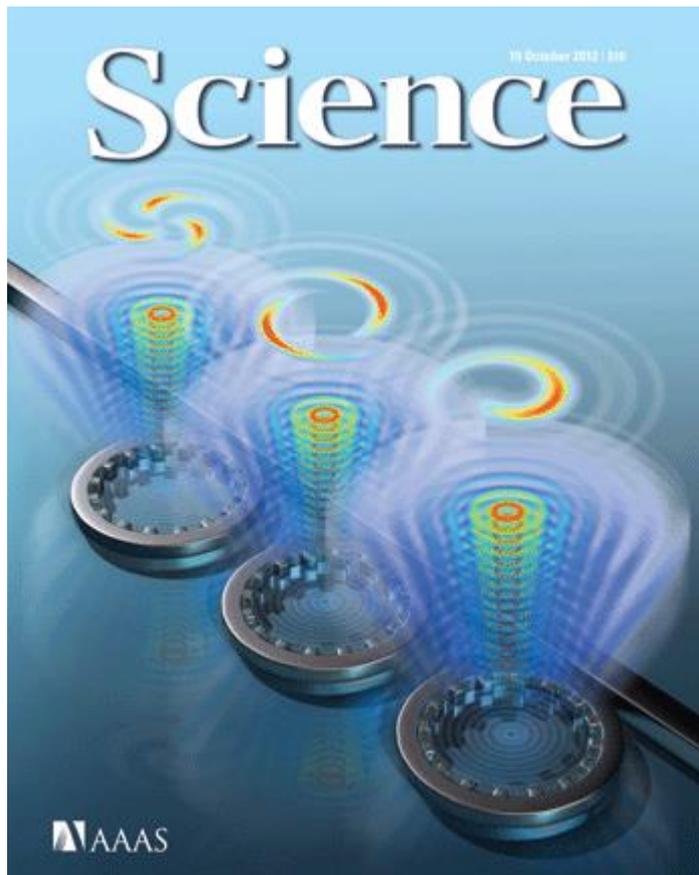


Внутрирезонаторная генерация вихревых пучков



Интенсивность мод Лагера-Гаусса, Инса-Гаусса, Эрмита-Гаусса

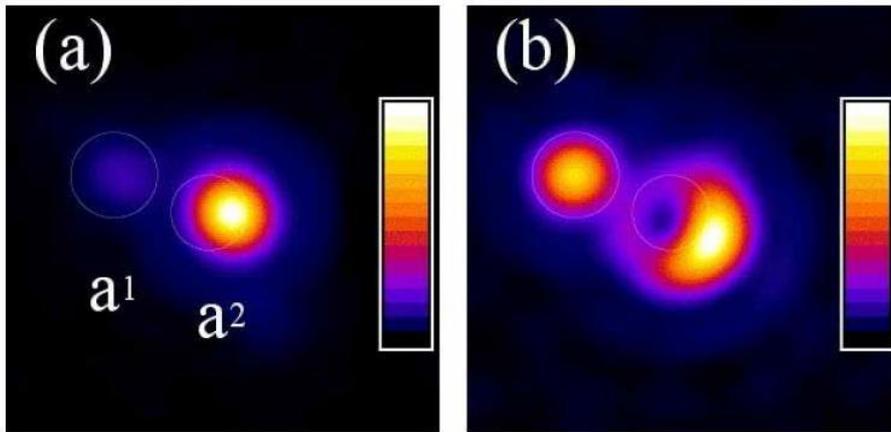
Внутрирезонаторная генерация вихревых пучков



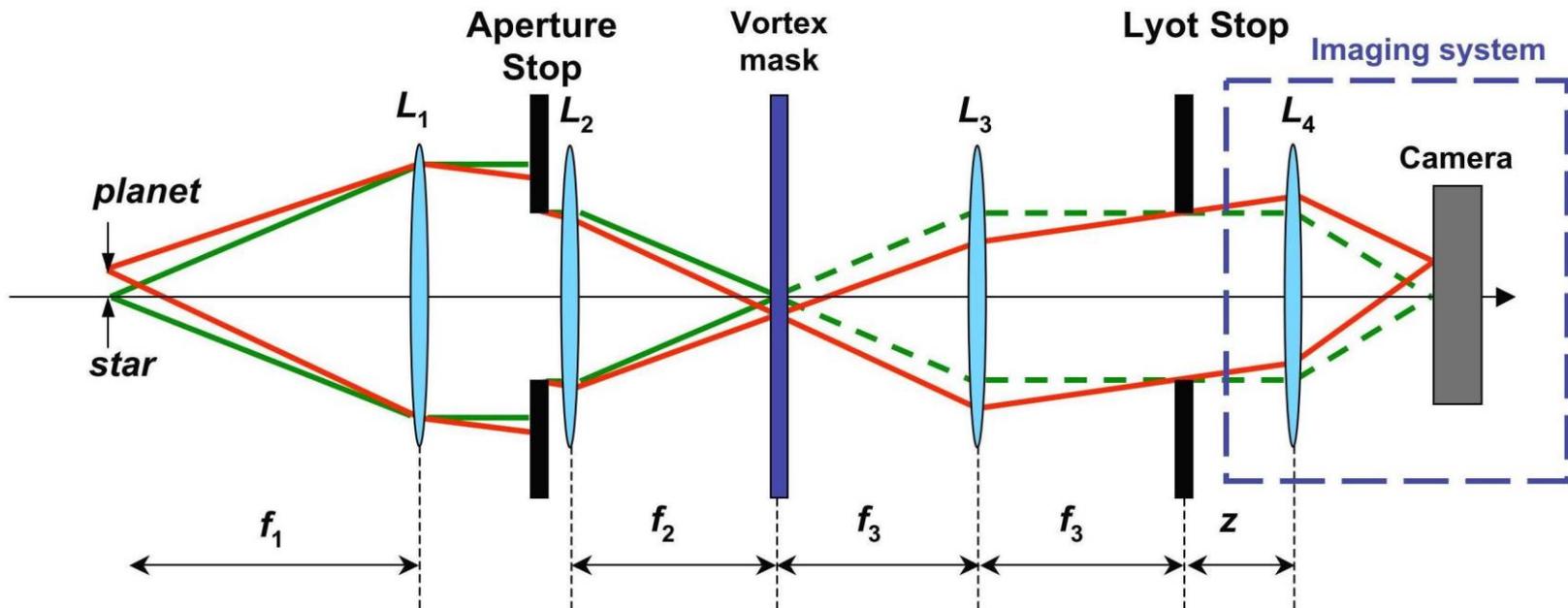
Кольцевой резонатор $R = 3.9$ мкм с вложенной дифракционной решеткой (а):
распределенная решетка в линейном волноводе из-за дифракции производит наклонную
плоскую волну (б); схема вихревого генератора на чипе (в)

X. Cai, J. Wang, M. J. Strain, B. J. Morris, J. Zhu, M. Sorel, J. L. O' Brien, M. G. Thompson,
and S. Yu, Science 338, 363–366 (2012). UK + China

Коронаграф – вихревой пространственный фильтр

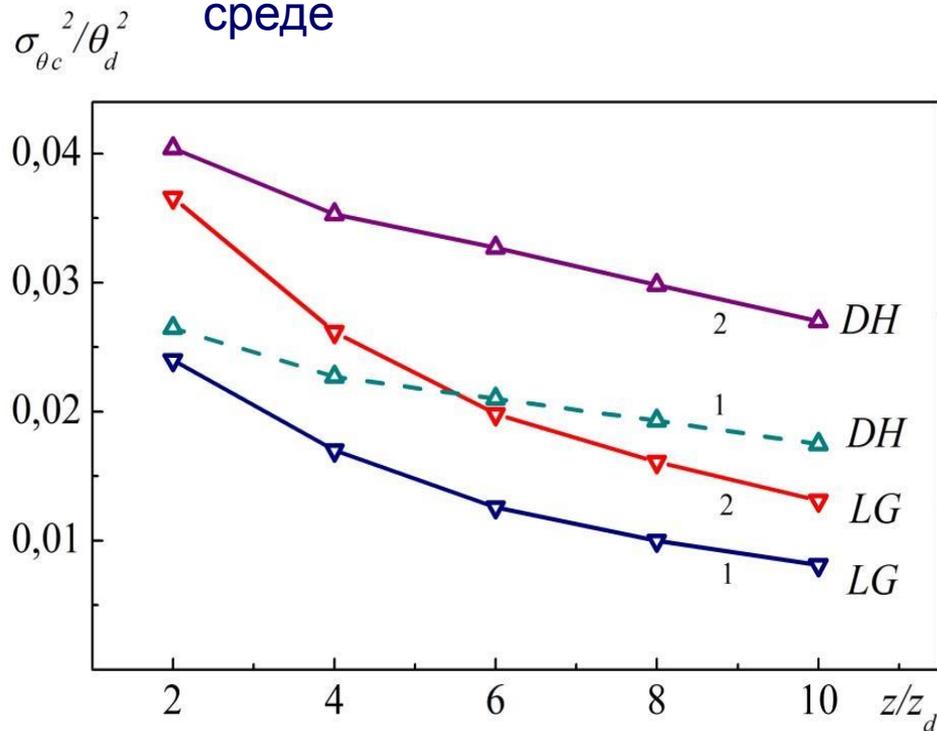


Grover Swartzlander Jr.



Вихревая стабилизация направления распространения лазерных пучков в случайно-неоднородной среде

Увеличение топологического заряда вихря лазерного пучка приводит к уменьшению его случайных блужданий в турбулентной среде

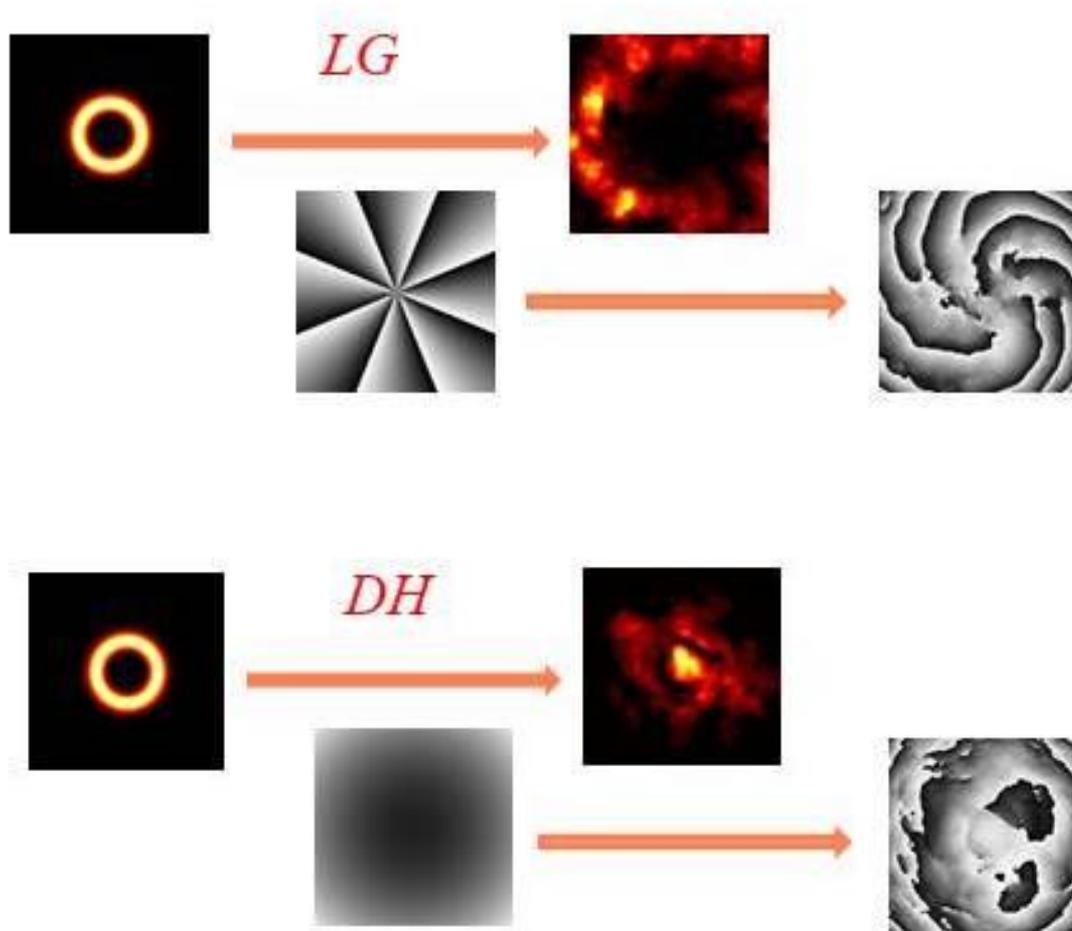


Нормированная на дифракционную расходимость ($1/ak$) дисперсия угловых блужданий безвихревого (DH) и вихревого лаггер-гауссова (LG) пучков с одинаковым начальным распределением интенсивности в дальней зоне дифракции за турбулентным слоем для различных значений внешнего масштаба турбулентности: $M_0=28a$ (1), $20a$ (2), a — радиус передающей апертуры

Aksenov V.P., Kolosov V.V. Pogutsa C.E. Applied Optics, 2014.V.53. P. 3607-3614.

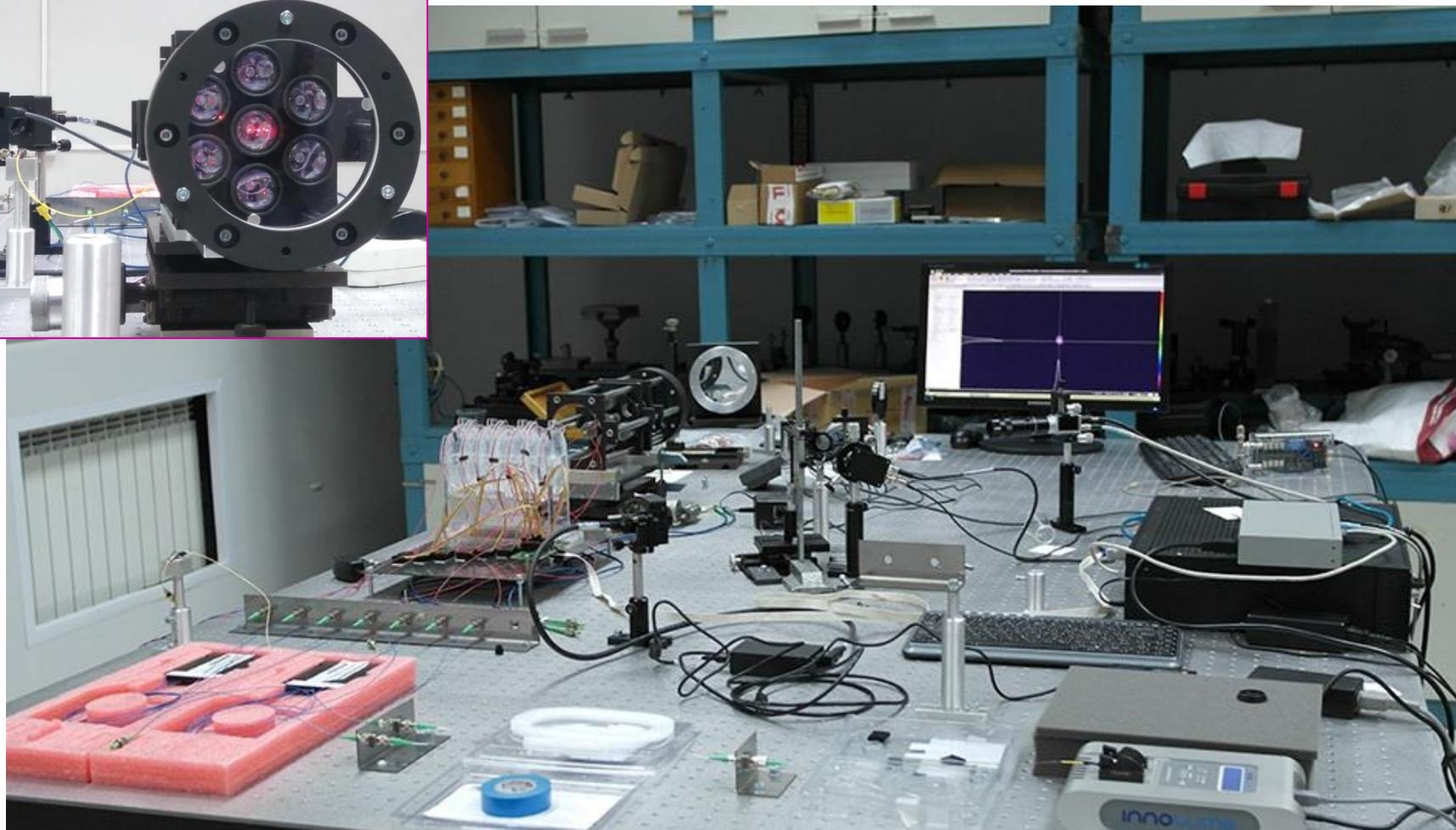
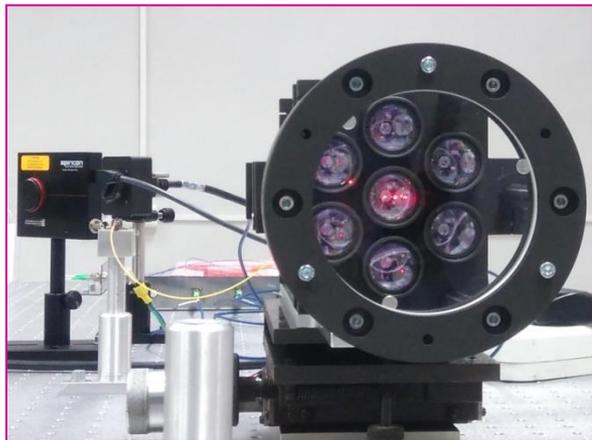
Aksenov V.P., Kolosov V.V., Filimonov G.A. Pogutsa C.E. J. Opt. 2016, V.18 . 054013.

Вихревая устойчивость лазерных пучков в случайно-неоднородной среде



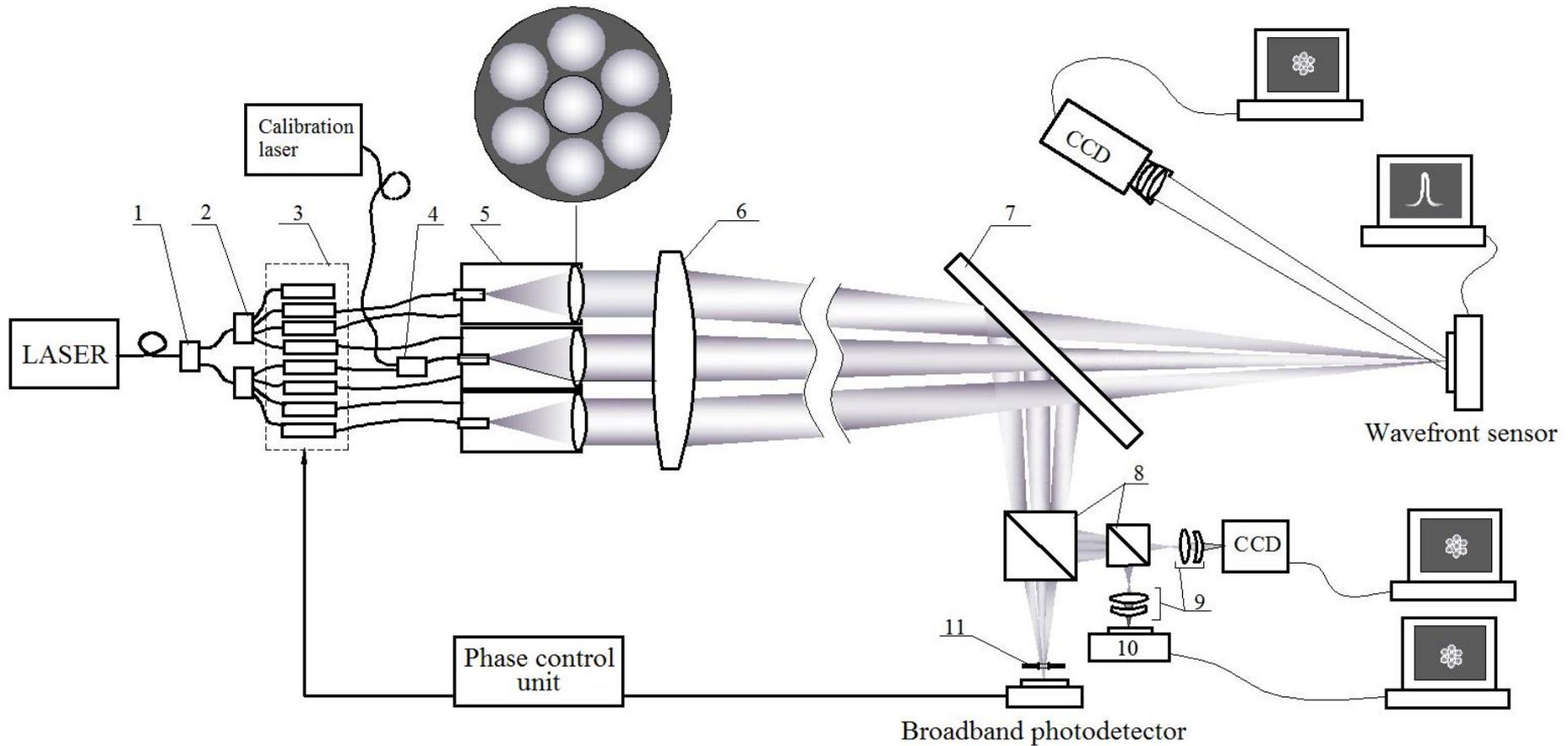
Пучок, обладающий винтовой фазой (LG), более устойчив к воздействию случайных неоднородностей среды, по сравнению с пучком с тем же распределением интенсивности, но с гладкой фазой (DH)

Когерентное сложение матрицы волоконных лазеров

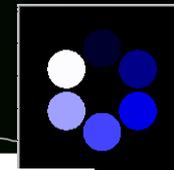
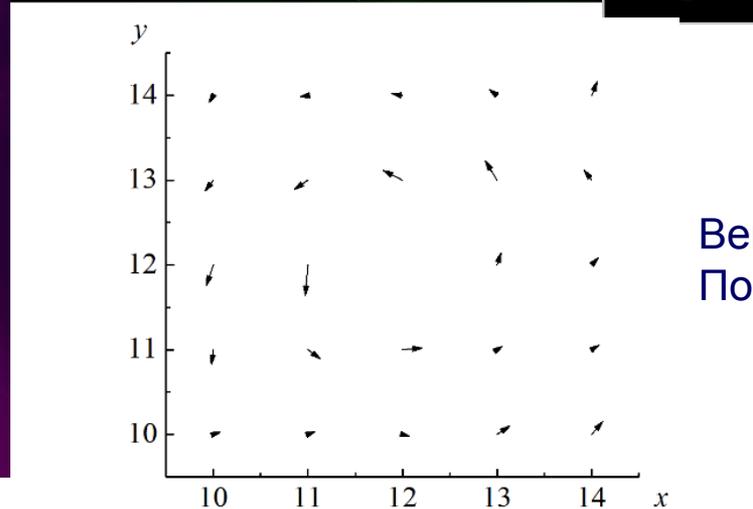
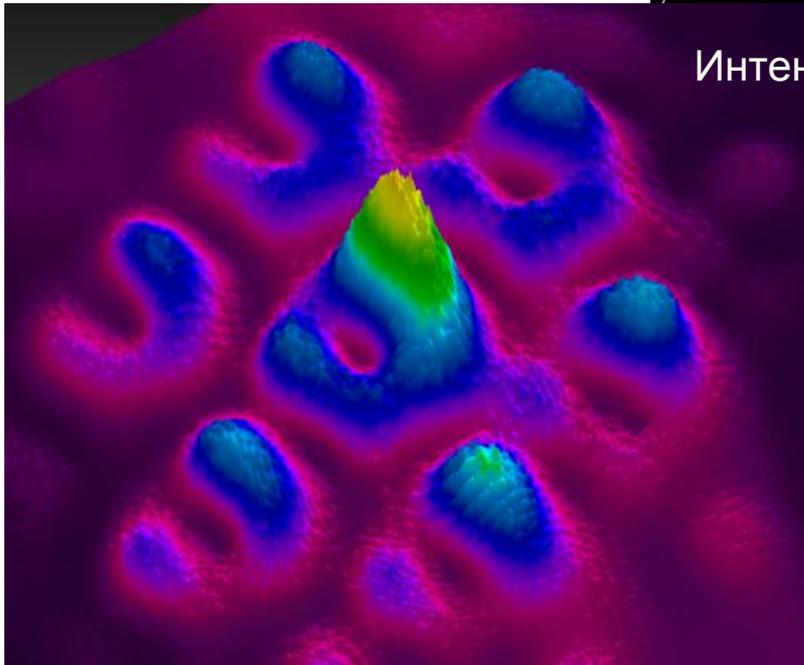
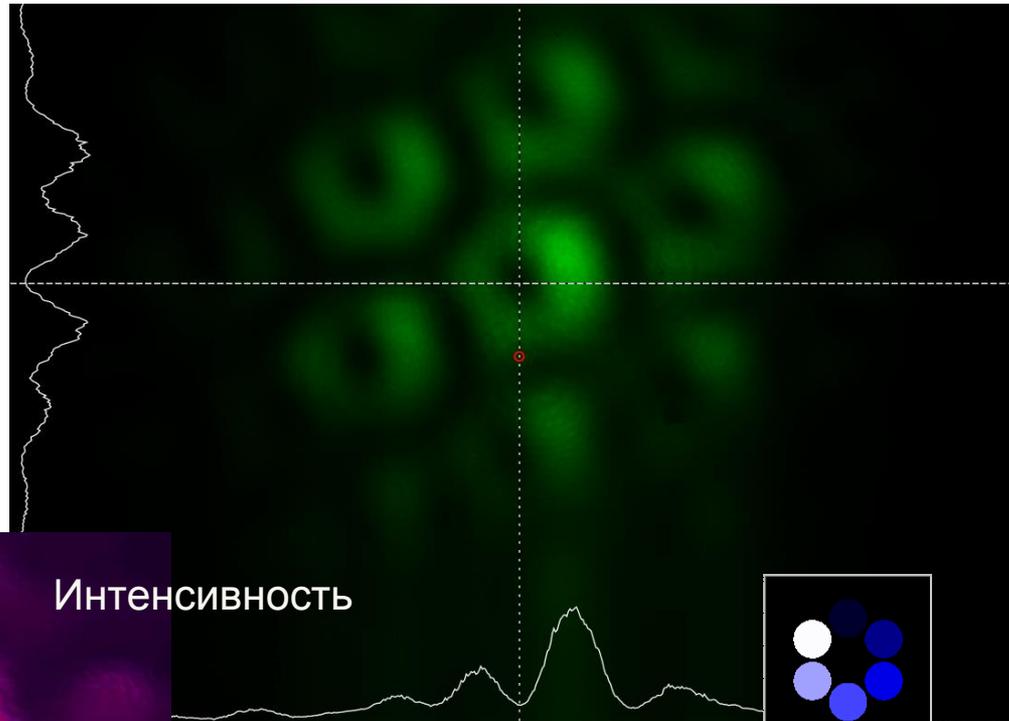
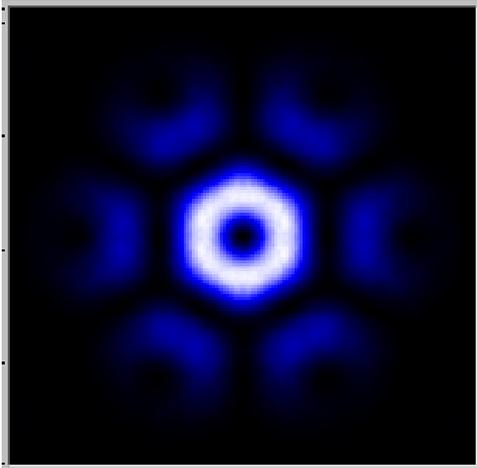


Система формирования лазерных пучков с управляемыми пространственными характеристиками, с возможностью формирования вихревых пучков, обеспечивает создание пучков с изменяемыми энергетическими, фазовыми и когерентными характеристиками, предназначенных для осуществления беспроводной оптической связи

Когерентное сложение матрицы волоконных лазеров



Эксперимент по формированию вихревого пучка



Перспективы и задачи оптики вихревых пучков

- ❖ Изучение оптических вихревых пучков: исследование свойств вихревых пучков Лагерра-Гаусса, Бесселя-Гаусса и др.; создание новых видов вихревых пучков, анализ их свойств; разработка новых методов кодировки / декодировки информации с использованием особенностей вихревых пучков.
- ❖ Исследование процессов распространения вихревых пучков в среде (в частности, в случайно-неоднородной атмосфере, поиск эффективных способов передачи информации по атмосферным каналам связи).
- ❖ Обратные задачи атмосферной сингулярной оптики.
- ❖ Создание эффективных алгоритмов коррекции волнового фронта пучка в условиях сильной турбулентности.

A wide, calm river flows through a lush green landscape. The river is the central focus, with a small island or peninsula in the middle. The sky is a clear, bright blue with a few wispy clouds. The overall scene is peaceful and scenic.

Спасибо за внимание!