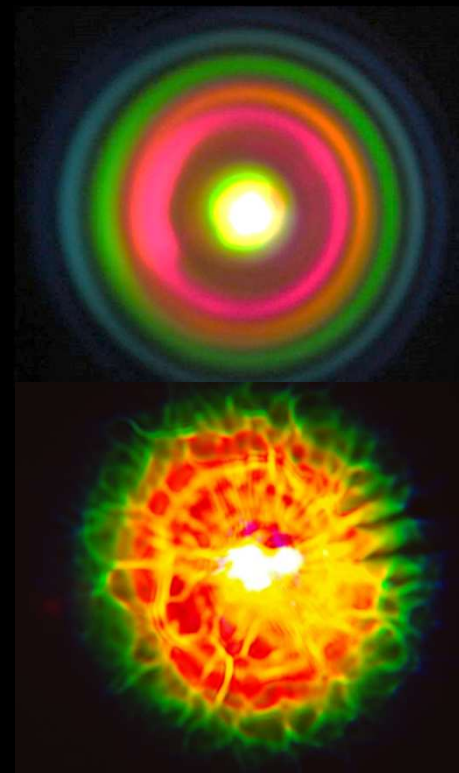


Нелинейная Фемтосекундная Оптика Атмосферы



Юрий Гейнц

д.ф.-м.н, заведующий Лабораторией нелинейно-оптических
взаимодействий ИОА СО РАН, г. Томск



Гейнц Юрий Эльмарович, 1963 г.р.



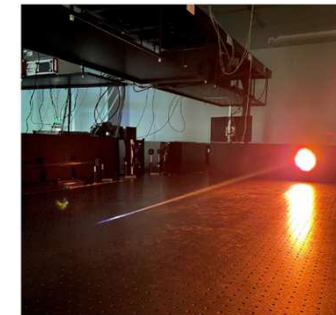
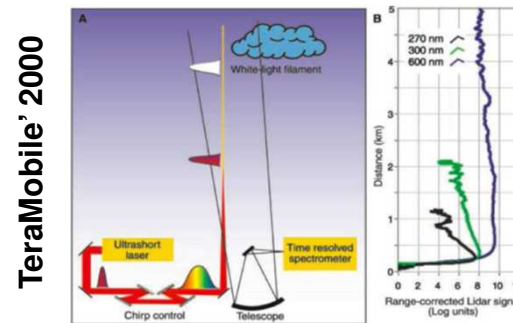
- 1986** Закончил [Радиофизический факультет Томского госуниверситета](#), распределился в [Институт оптики атмосферы СО АН СССР \(Томск\)](#).
- 1987-1990** [аспирантура ТГУ](#), моделирование нелинейной оптики атмосферного аэрозоля.
- 1990** [к.ф.-м.н.](#) «Фазовый взрыв водных капель в поле мощного лазерного излучения».
- 1990 – н.в.** **Направление:** Нелинейная оптика аэрозоля, вынужденные рассеяния, тепловой взрыв, оптический пробой, перенос излучения в атмосфере.
- 1994** [стажировка](#) в университете Нью-Мексико ([США](#))
- 2003** [д.ф.-м.н.](#) «Нелинейное рассеяние лазерного излучения капельным аэрозолем».
- 2005 – н.в.** **Фемтосекундная нелинейная оптика атмосферы:** самофокусировка, филаментация, оптический пробой, нелинейная эмиссионная спектроскопия
старший – ведущий - главный [научный сотрудник ИОА СО РАН](#)
(лаборатория нелинейно-оптических взаимодействий - **ЛНОВ**)
- 2016 – н.в.** [Эксперт РФФИ, РНФ, РАН](#); с 2019 – [эксперт ЭС ВАК по физике](#).
- 2022 – н.в.** [Заведующий ЛНОВ](#), член редколлегии журнала «Оптика атмосферы и океана»



Нелинейная Фемтосекундная Оптика Атмосферы

(НФОА)

Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы – это относительно **молодое** научное направление, появившееся в связи с созданием и применением мощных ультракоротких лазеров в атмосферных исследованиях.



Образовалась на стыке трех научных направлений:

- нелинейная оптика атмосферы
- физика сверхсильных световых полей
- спектроскопия сверхбыстрых процессов

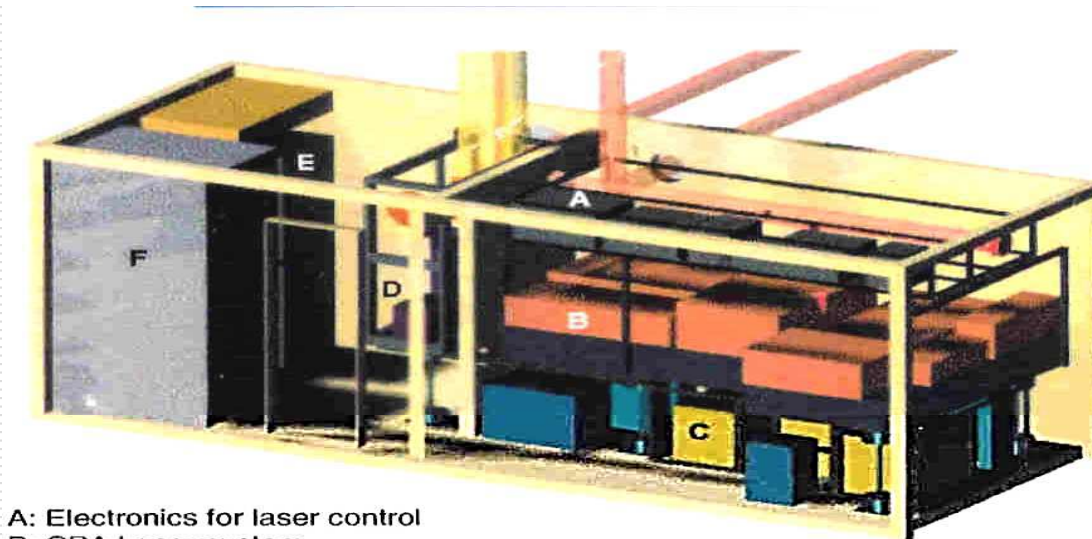
Нелинейная Фемтосекундная
Оптика Атмосферы

Teramobile

Joint French-German project on long-distance fs-laser pulses
propagation and atmospheric applications

Год рождения - 2000г.

Teramobile LIDAR



- A: Electronics for laser control
- B: CPA Laser system
- C: Power units (stored in a closed clima box)
- D: Detection box (telescope, spectrometer, detectors,...)
- E: Computer and electronics
- F: Power supply and air conditioning

Nominal laser specifications:

shortest pulse 70 fs, energy 350 mJ → 5 TW, rep. 10 Hz



первый в мире мобильный фемтосекундный лидар «белого света» для исследования распространения фемтосекундных импульсов и возникающего при этом излучения суперконтинуума в атмосфере



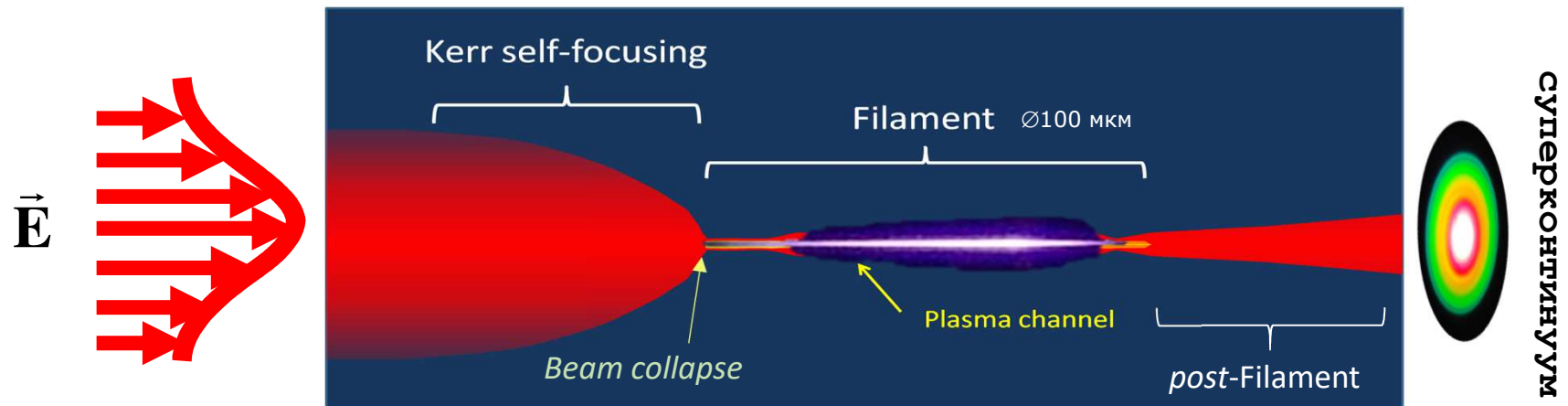
ЛАЗЕРНАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ – Фундамент НФОА

Филаментация

Это специфический режим распространения мощных лазерных импульсов в средах с фокусирующей оптической нелинейностью. Причина – **самофокусировка**. -- G.A. Mourou (1995)

Самофокусировка

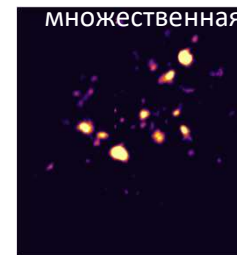
За счет эффекта Керра оптическая среда (воздух) может «уплотняться» под действием оптического излучения и, подобно обычной выпуклой линзе, начинает **фокусировать** световую волну по мере ее распространения. -- Г. А. Аскарьян (1961) , В.И. Таланов (1964)



Порог самофокусировки пучка:

$\lambda = 0.8 \text{ мкм}$
Воздух : 5 ГВт
Вода : 5 МВт

$P \gg$



Научная Активность

Физические модели филаментации

- ❑ Совокупность **движущихся фокусов** (Луговой & Прохоров 1968)
- ❑ **Самонаведенный волновод** в среде (Braun 1995)
- ❑ **Динамическое восполнение энергии** филамента (Mlejnek 1998)
- ❑ «**Световая пуля**» - пространственно-временной солитон (Di Trapani 2002)
- ❑ Возникновение и взаимодействие **нелинейных X-волн** (Conti 2003)

Мировые научные конкуренты

- ❑ Центр оптики, фотоники и лазеров университета Лаваль (Канада);
- ❑ Университет экспериментальной физики (Германия);
- ❑ Лаборатория биофотоники Женевского университета (Швейцария);
- ❑ Комиссия по атомной и альтернативной энергии (Франция);
- ❑ Brookhaven National Laboratory, Townes Laser Institute (США);
- ❑ State Key Laboratory of High Field Laser Physics (Китай).

Laser Pulse Filamentation Model

(Slowly-Evolving-enVelope-Approximation)

Nonlinear Schrödinger equation for E-field envelope

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial z} - \frac{i}{2n_0k_0} \nabla_{\perp}^2 + i \frac{k_{\omega}''}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} U(\mathbf{r}_{\perp}, z; t) - ik_0 \Delta n(I) U(\mathbf{r}_{\perp}, z; t) + \frac{\alpha_N(I)}{2} U(\mathbf{r}_{\perp}, z; t) = 0$$

Diffraction

Chromatic dispersion

Phase nonlinearity
(Kerr, plasma)

Nonlinear absorption

Optical nonlinearity model

$$\Delta n(I) = \hat{n}_2(I) - n_4(I^2) - n_p(I^K) \pm \dots$$

Kerr

Quintic

Plasma

Kerr response model

$$\hat{n}_2(I) = \frac{n_2}{2} \left(|U(t)|^2 + \tau_R^{-1} \int_0^t \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_R}\right) |U(t')|^2 dt' \right)$$

Instant response

Inertial response



Проблемы нелинейной фемтосекундной оптики атмосферы

Прямые задачи

- транспортировка высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения через атмосферу
- оптическая связь
- стимулирование молниевых разрядов
- генерация *терагерцовых* электромагнитных импульсов в атмосфере



Обратные задачи

- лазерное зондирование атмосферы
- дистанционная LID спектроскопия в атмосфере

[Чем интересно УКИ ?](#)

Преимущества ультракороткого излучения:

- Малая длительность импульса
- Высокая мощность и пиковая интенсивность (от *тера-* до *петаватт*)
- Широкий спектр импульса (до *петаГц*)
- Малая пространственная протяженность импульса (*сотни мкм*)

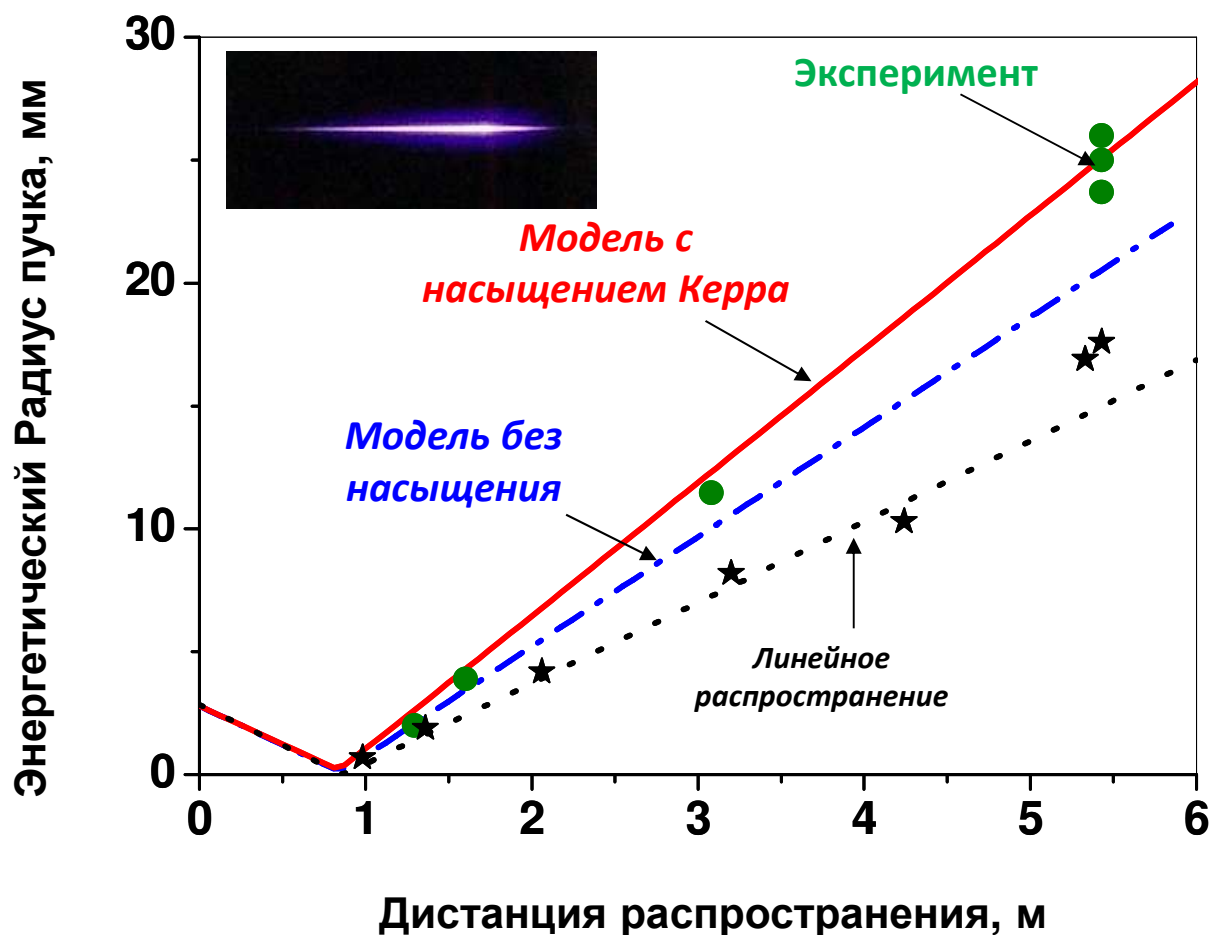


Особенности распространения **сфокусированных** фс-импульсов в воздухе и аэрозоле.

Лабораторные исследования и численное моделирование Лазерной Филаментации

Необходимо для построения полуэмпирических моделей взаимодействия излучения и атмосферной среды. Это основа для решения задач практической атмосферной оптики.

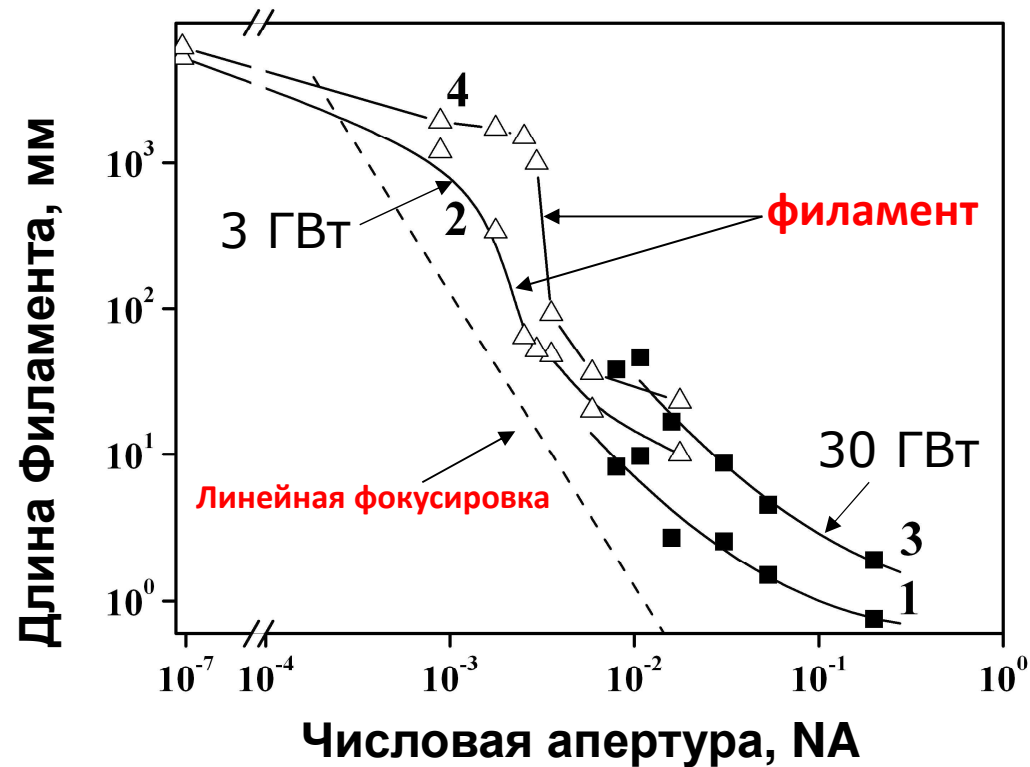
Филаментация **сфокусированных** лазерных импульсов



- Эксперименты по сфокусированной филаментации в воздухе показали значительно большую **угловую расходимость пучка**, чем предсказывали традиционные модели керровской нелинейности.
- Эмпирические данные послужили основой для **ревизии оптической модели** взаимодействия остросфокусированных ультракоротких лазерных импульсов с воздухом (снижение роли ориентационного эффекта Керра, туннельная ионизация).

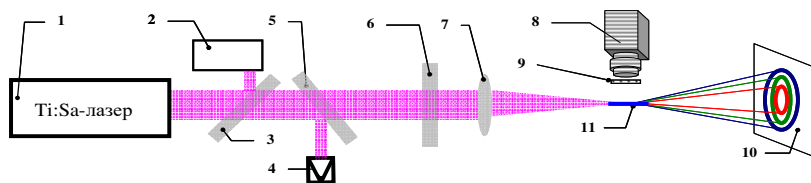


Длина плазменного филамента



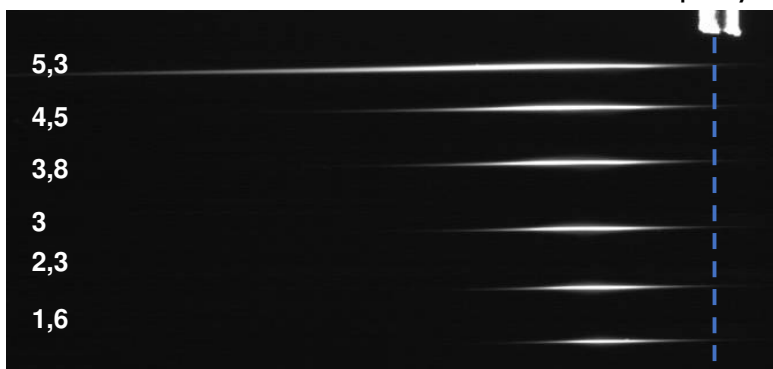
- **Повышение остроты фокусировки** лазерного пучка (рост NA) приводит к стабильному **уменьшению** поперечного размера и средней длины формирующихся филаментов.
- При наиболее острой фокусировке **протяженность плазменного канала, превышает** линейные размеры фокальной перетяжки.

Измерения пространственных характеристик филаментов для сфокусированных гармоник Ti:Sapphire-лазера



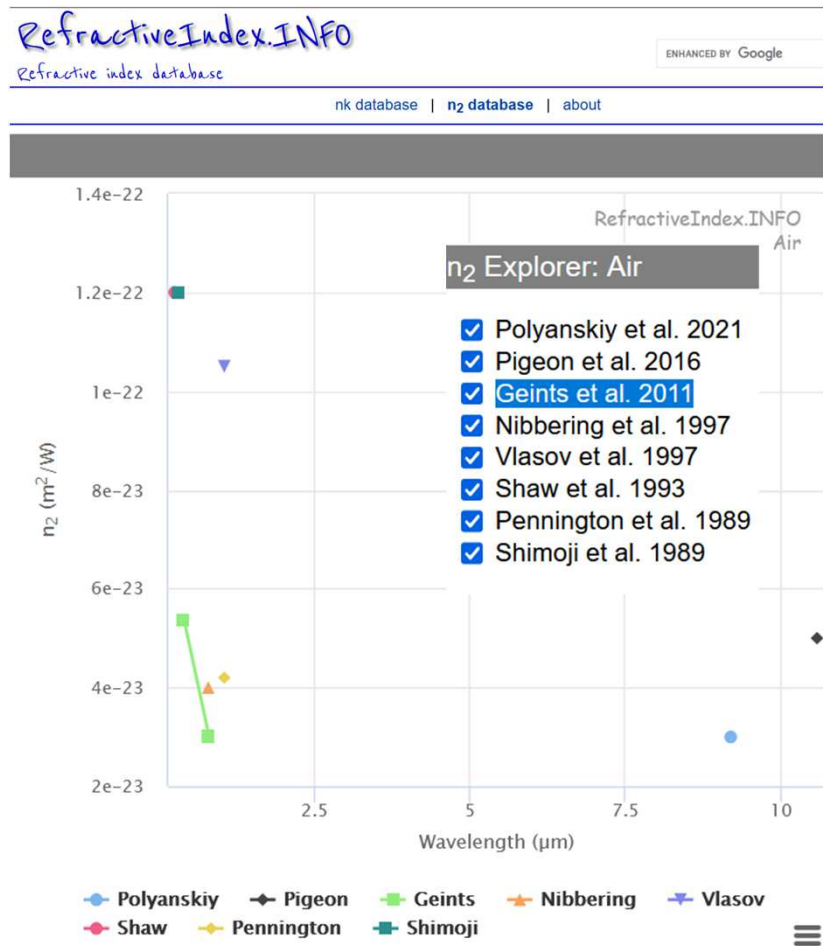
$\lambda = 400 \text{ нм}$

фокус



Фотографии филаментов в воздухе при фокусировке $f = 200 \text{ мм}$ ультракоротких импульсов Ti:Sa-лазера

- Получены экспериментальные данные по величине нелинейной добавки к коэффициенту преломления воздуха, обусловленной эффектом Керра.



Распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в атмосфере

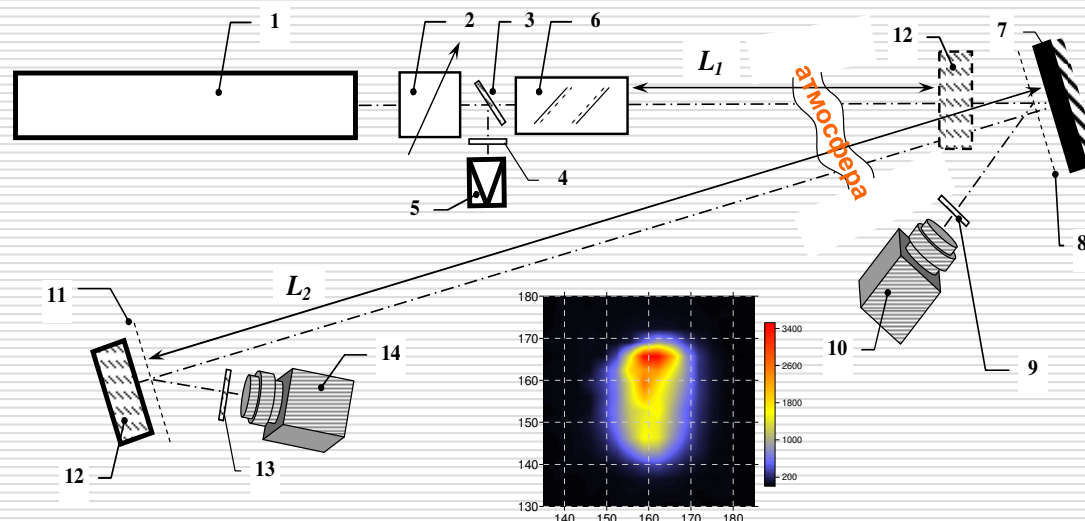
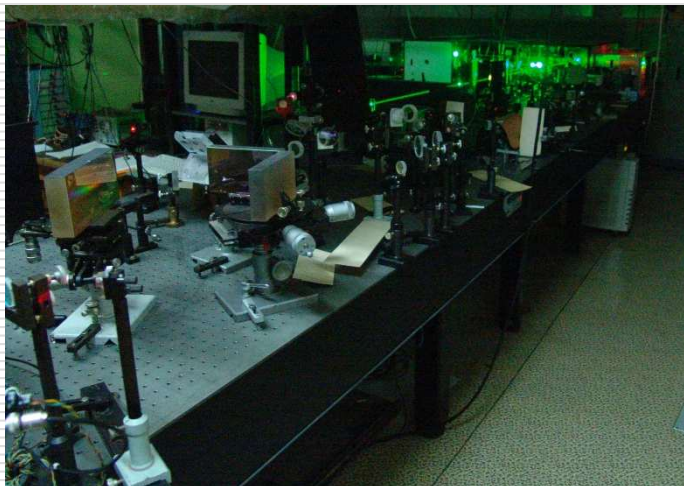


Схема эксперимента

1 – источник излучения; 2 – аттенюатор; 3 – полупрозрачное зеркало; 4, 9, 13 – светофильтры; 5 – фотодиод; 6 – компрессор; 7 – глухое зеркало; 8, 11 – экраны; 10 – фоторегистратор; 12 – макетные образцы; 14 – CCD-камера.

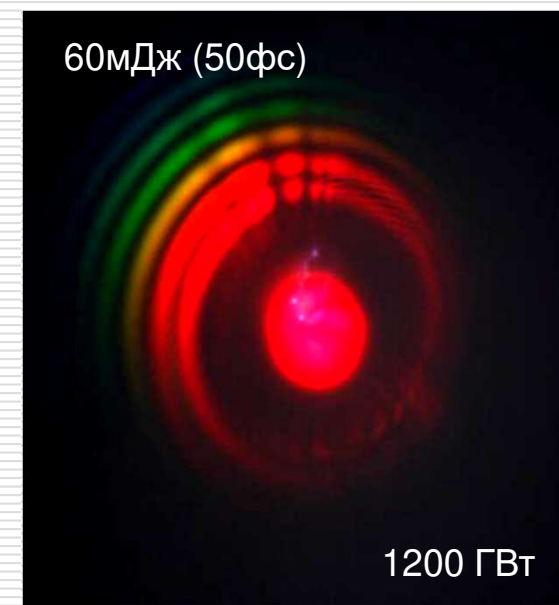
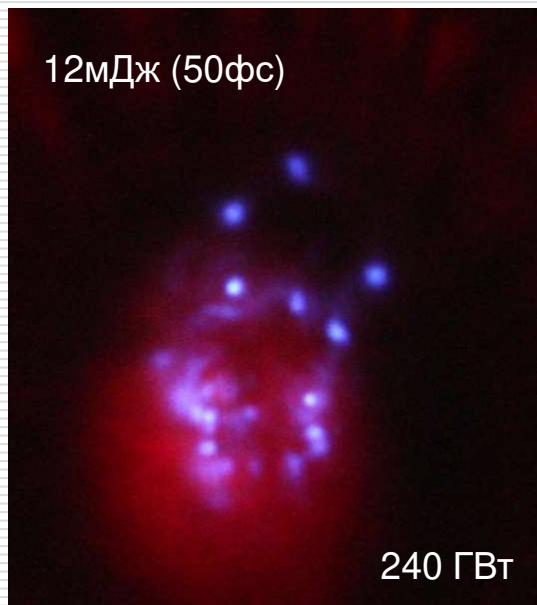
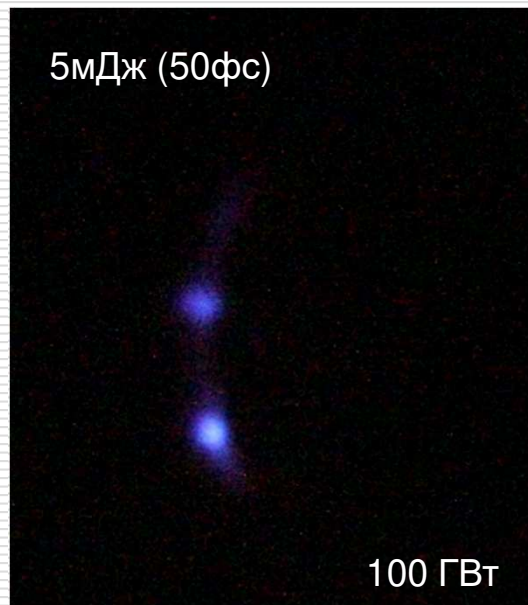
Длина волны: 800 нм,
энергия: до 60 мДж,
длительность: 66 фс,
мощность: до 2 ТВт



Лазерный пучок после филаментации на атмосферной трассе длиной 85 м

Режим **пространственно-детерминированной** филаментации пучка

Профиль фс-излучения в конце трассы



! Формируется **устойчивая картина филаментации** в смысле сохранения пространственной конфигурации световых каналов при изменении мощности импульса.

Сильное влияние дифракционных эффектов.



Задача:

Контроль и манипулирование филаментацией

Цель исследований:

*Получение заданной конфигурации лазерных
филаментов в заданном участке
оптической трассы*

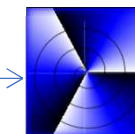
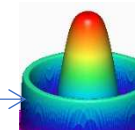
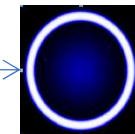


Манипулирование через Профилирование

Методики:

➤ Деформация глобального профиля

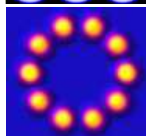
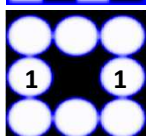
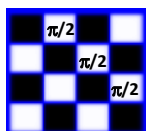
- Трубочатый пучок (*LG10*)
- Гибридный пучок (*BG*)
- Вихревой пучок



Подавление осевой
филаментации

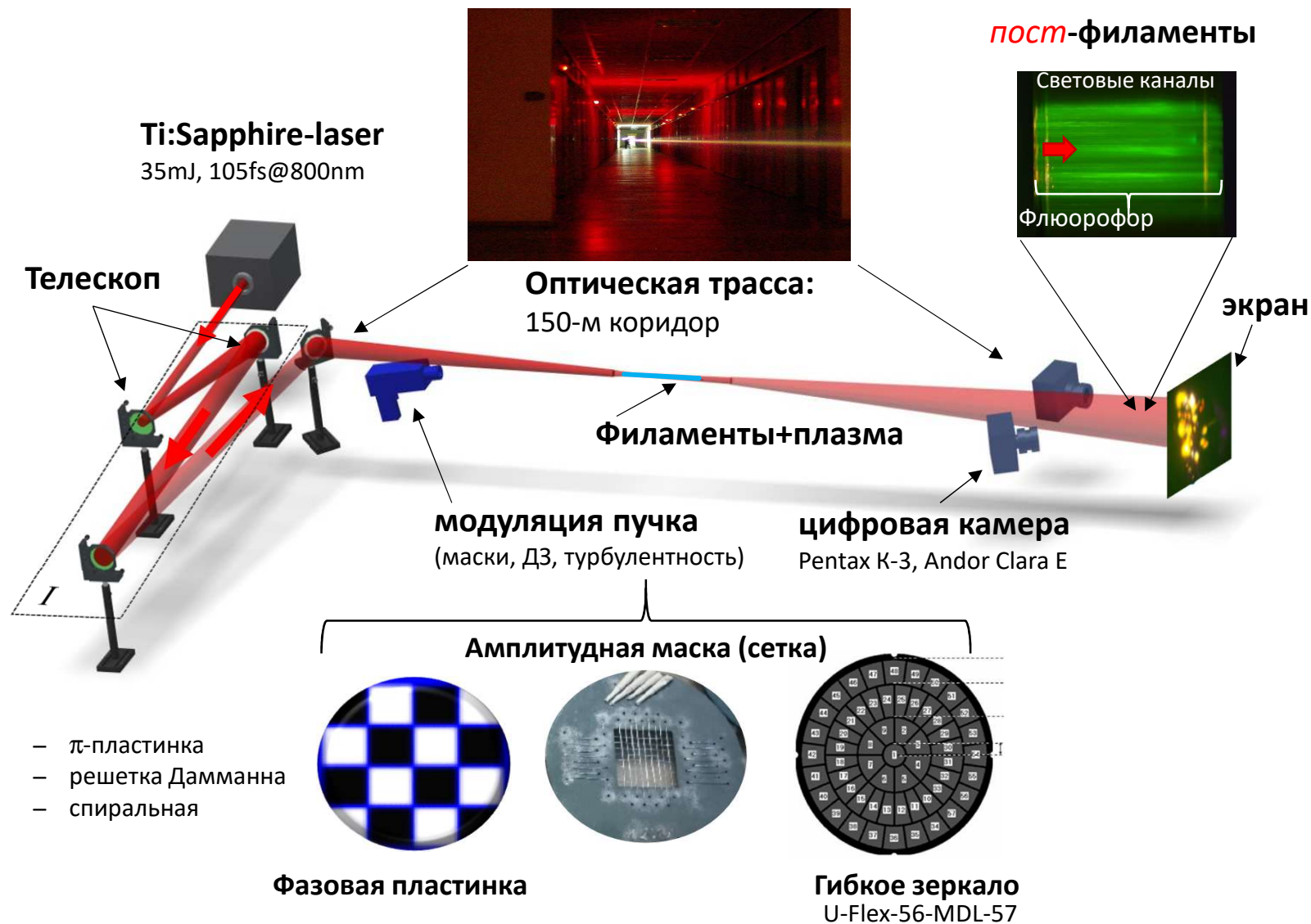
➤ Сегментирование энергии импульса

- Модуляция фазы (*SLM, гибкое зеркало*)
- Модуляция амплитуды (*сетчатые маски*)
- Синтезированные пучки (*сборки*)



Больше одиночных
филаментов

Эксперименты по Структурированной Филаментации

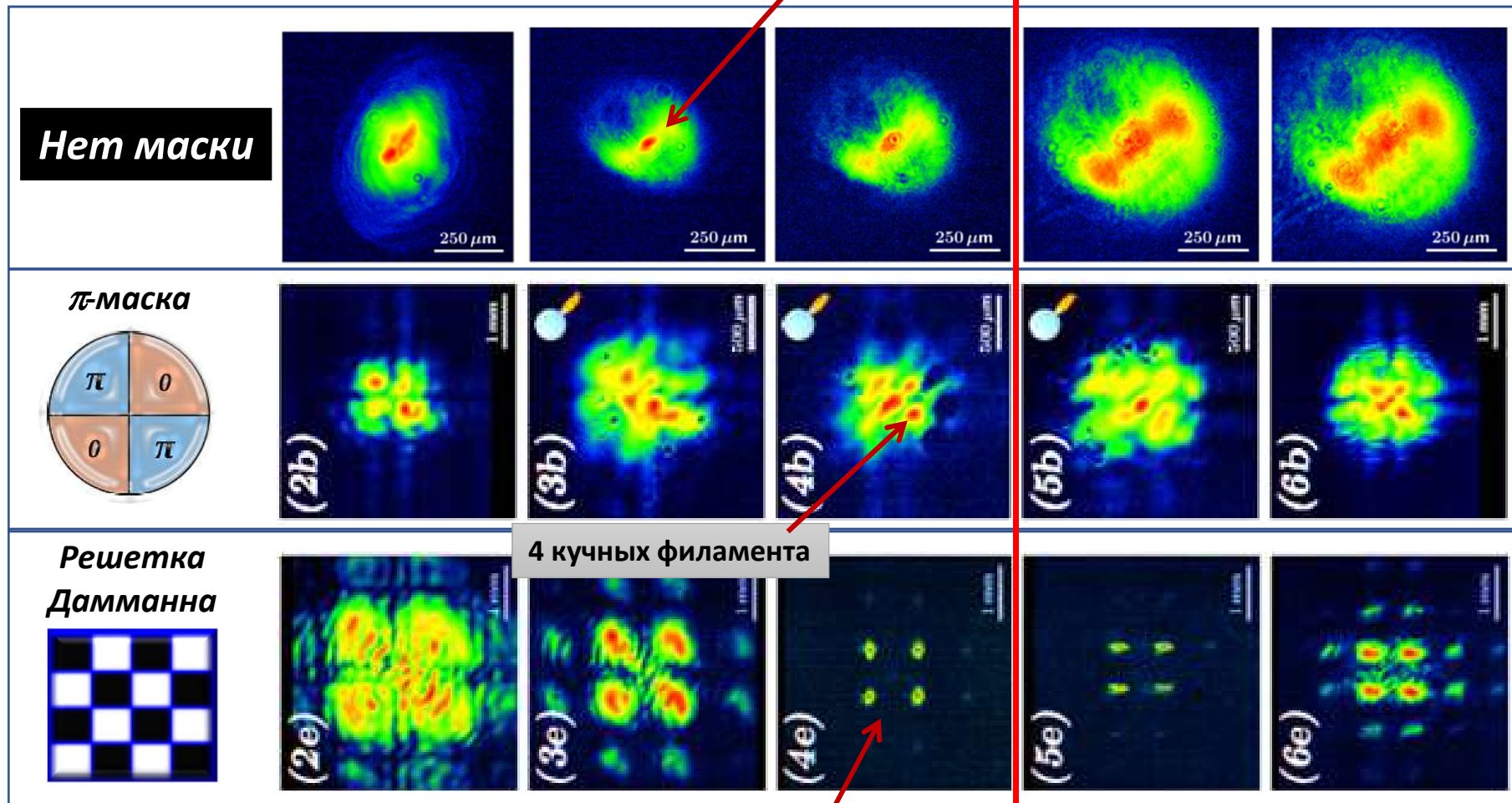


Структурирование Филаментов Фазовыми Масками

Дистанция распространения \rightarrow

Один филамент

Геометрический фокус линзы



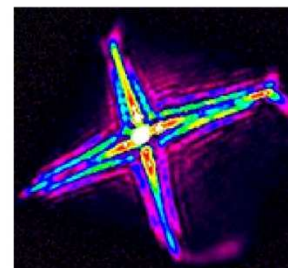
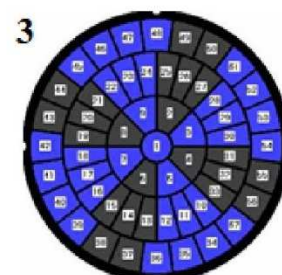
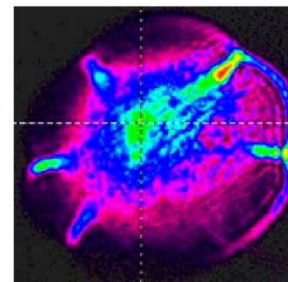
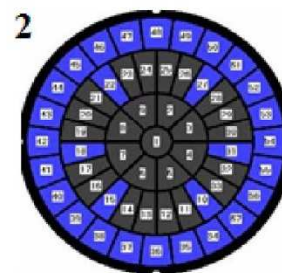
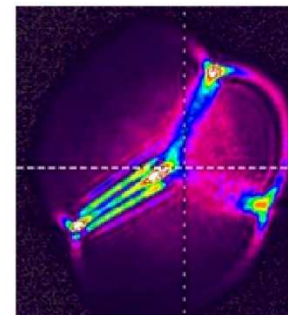
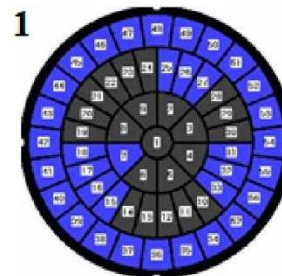
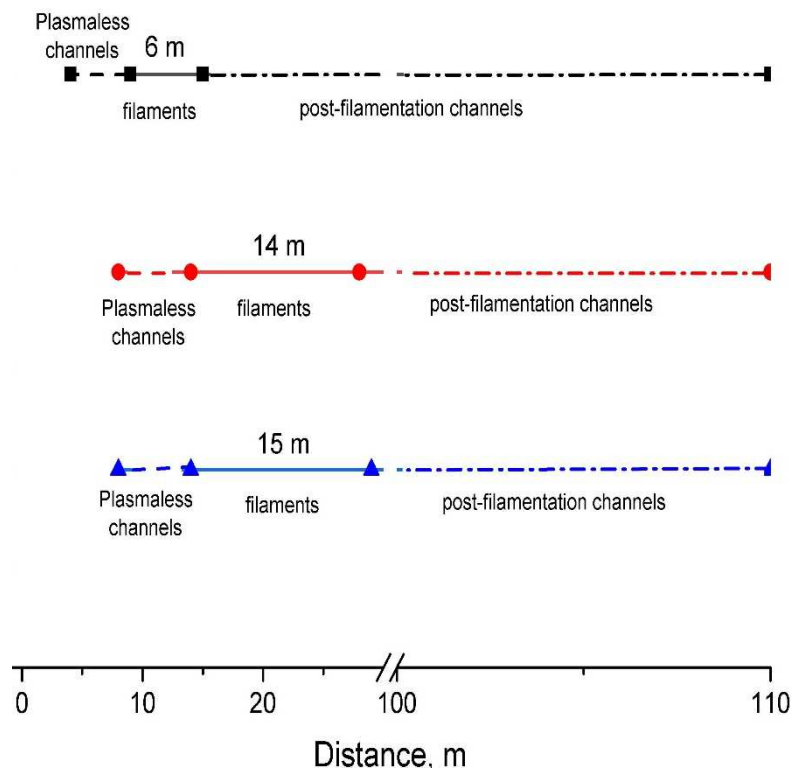
4 кучных филамента

4 разнесенных филамента

3mJ, 50fs @812nm

Изменение **Числа** Филаментов путем Фазовой Модуляции Импульса

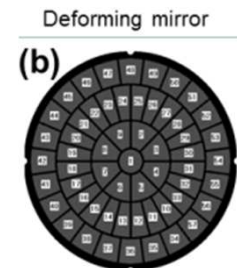
Положение зоны филаментов



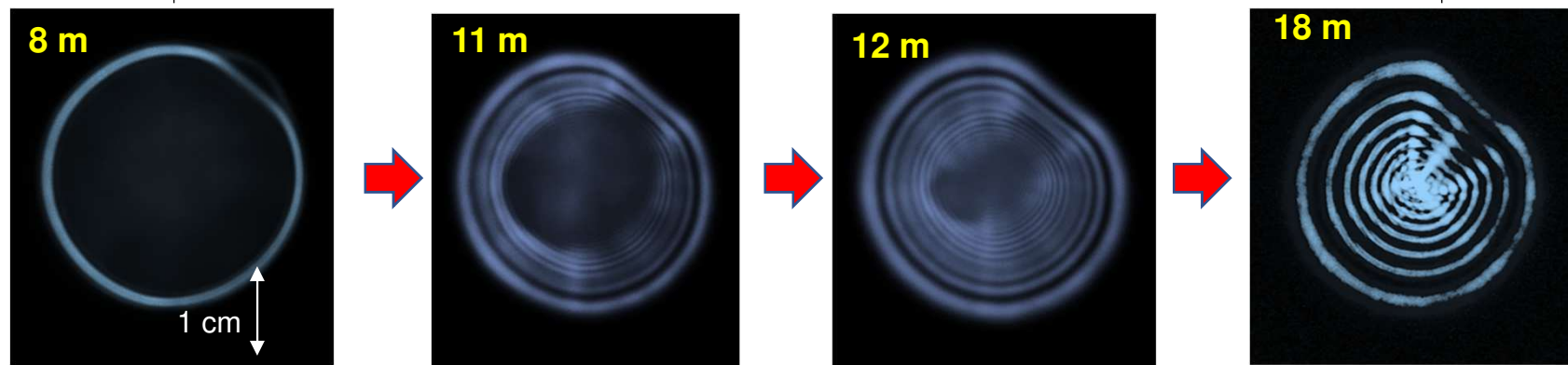
Конфигурация сегментов ДЗ

Управление **числом** филаментов

Изменение **Конфигурации** Филаментов

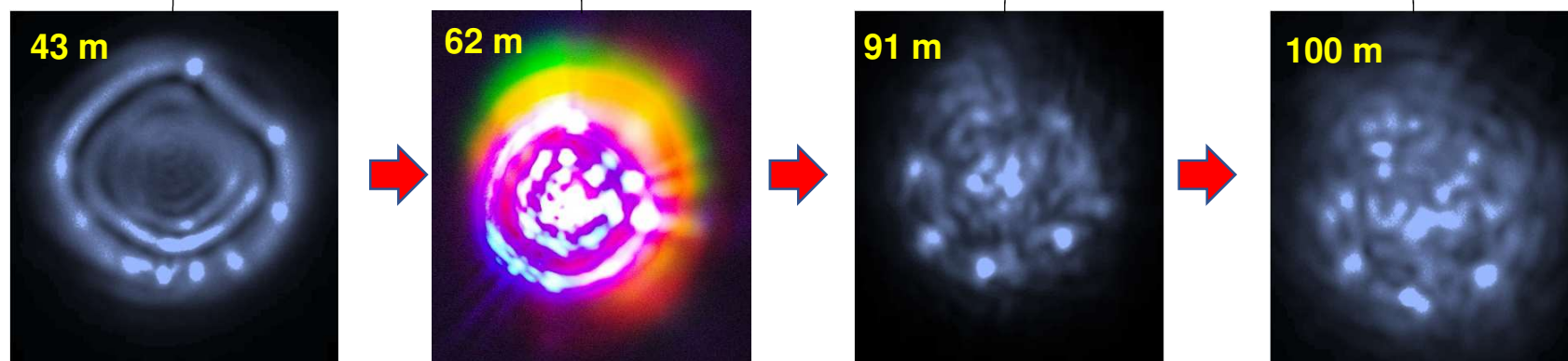


Образование кольцевой структуры



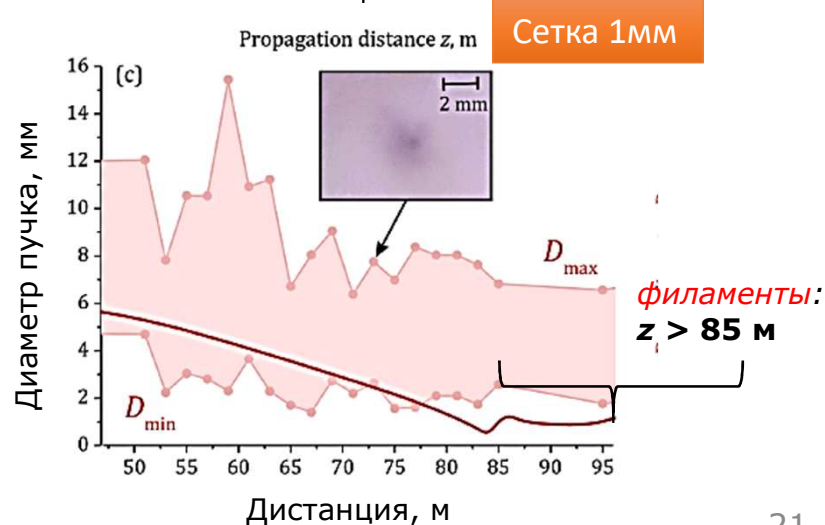
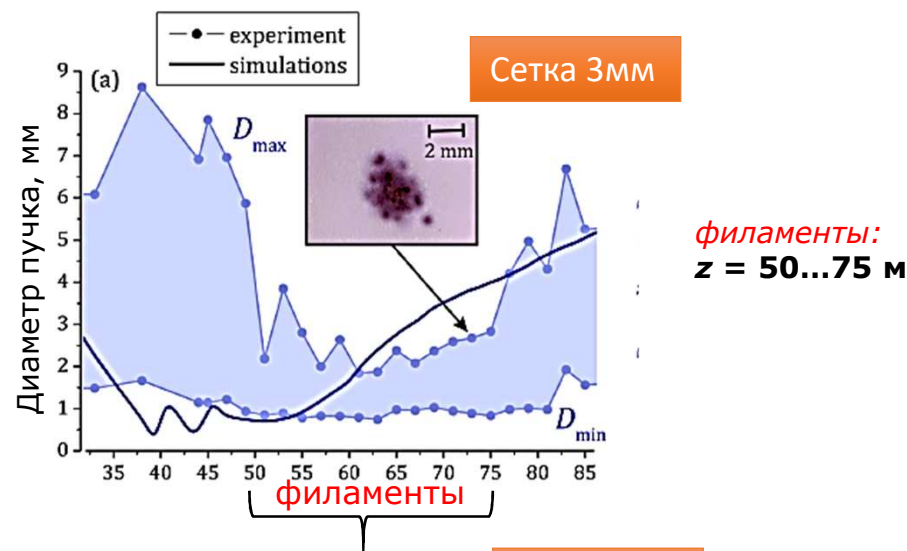
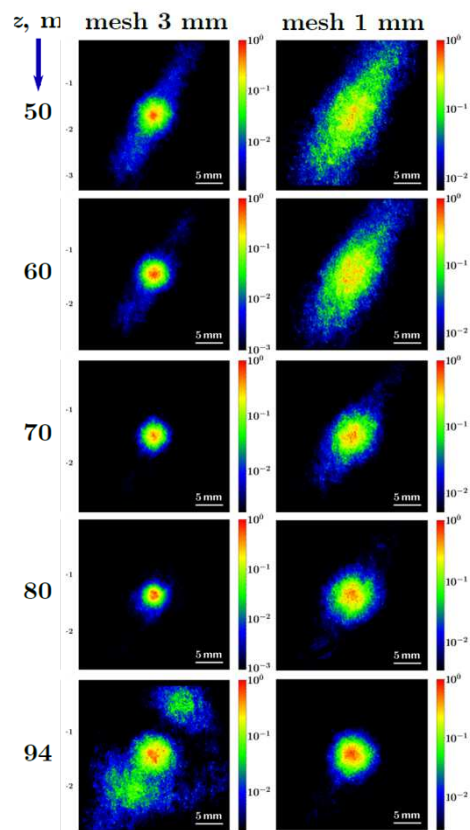
Филаментация по кольцам

пост-Филаменты



Манипулирование **Дистанцией** Филаментации путем Амплитудной Модуляции Импульса

Сегментирование излучения с помощью металлических сеток



Управление **дистанцией** филаментации



Взаимодействие фемтосекундных импульсов с водными каплями

NONLINEAR OPTICS

Water droplet emission

What happens when gigawatt peak-power femtosecond laser pulses interact with millimetre-scale water droplets? The answer, according to scientists in Russia, is the intense emission of visible light from a laser-induced plasma that forms within the droplets, with a strong spectral broadening as the laser power rises.

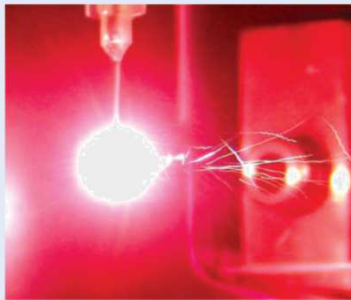
The self-focusing properties of transparent spherical water particles can create very intense optical fields, making them a potentially interesting tool for studying a variety of nonlinear optical effects. Yuri Geints and co-workers from the Zuev Institute of Atmospheric Optics in Tomsk and the Institute of Automation and Control Processes in Vladivostok have now investigated the dynamics of the interaction between laser pulses and water droplets as a function of laser power (*Opt. Lett.* **35**, 2717–2719; 2010). The researchers prepared large millimetre-size droplets, which have sufficient curvature and volume for realizing the required focusing effect.

They then focused femtosecond pulses from a Ti:Sapphire chirped-pulse amplification laser (with a central wavelength of 800 nm, repetition rate



of 1 kHz, pulse energy of 1 mJ and beam diameter of 7 mm) onto a droplet of distilled water. The peak power of the laser pulses was varied over the range of 1–25 GW. The droplet emission was measured by a spectrometer in the wavelength range of 195–1,150 nm.

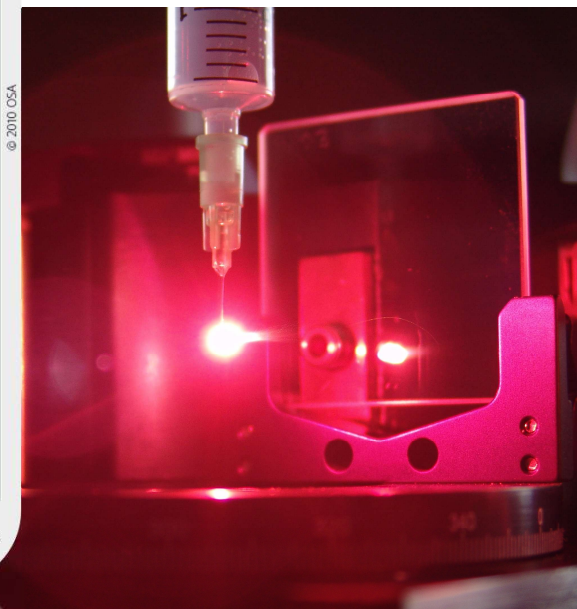
The emission was sparkling white to the naked eye but orange-red when viewed through a neutral density filter. The areas of light emission within the droplet have a distributed and granulated structure, which is indicative of boiling. The researchers measured emission lines of N₂ in the



droplet (near 430 and 575 nm), and estimated that the laser-induced optical breakdown caused a rise in temperature of approximately 1,000 °C.

For higher peak-power laser pulses with durations of less than 285 fs, the emission spectra widened dramatically and an extended pedestal formed around the incident wavelength of 800 nm. The authors believe that this is attributable to self-phase modulation effects of the laser pulses as they propagate within the droplet.

NORIAKI HORIUCHI



670

NATURE PHOTONICS | VOL 4 | OCTOBER 2010 | www.nature.com/naturephotonics

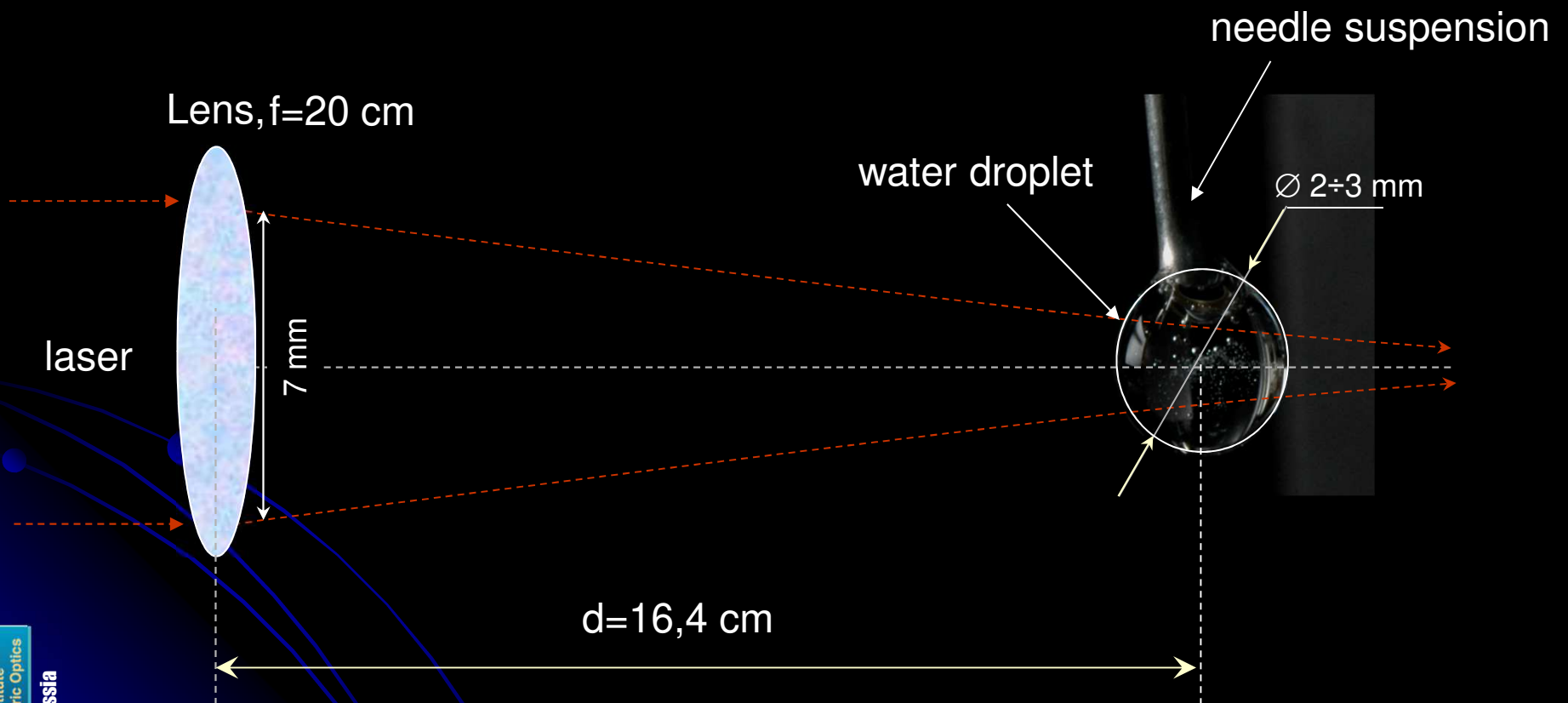
© 2010 Macmillan Publishers Limited. All rights reserved

630

NATURE PHOTONICS | VOL 4 | OCTOBER 2010 | www.nature.com/naturephotonics

ИОА СО РАН, ИАПУ ДВО РАН

Схема Эксперимента по фс-Взрыву Капли



Оптический пробой и вскипание капли

Visible emission

$t_1 < t_2 < t_3 < t_4 \sim 1s$
Successive time instants

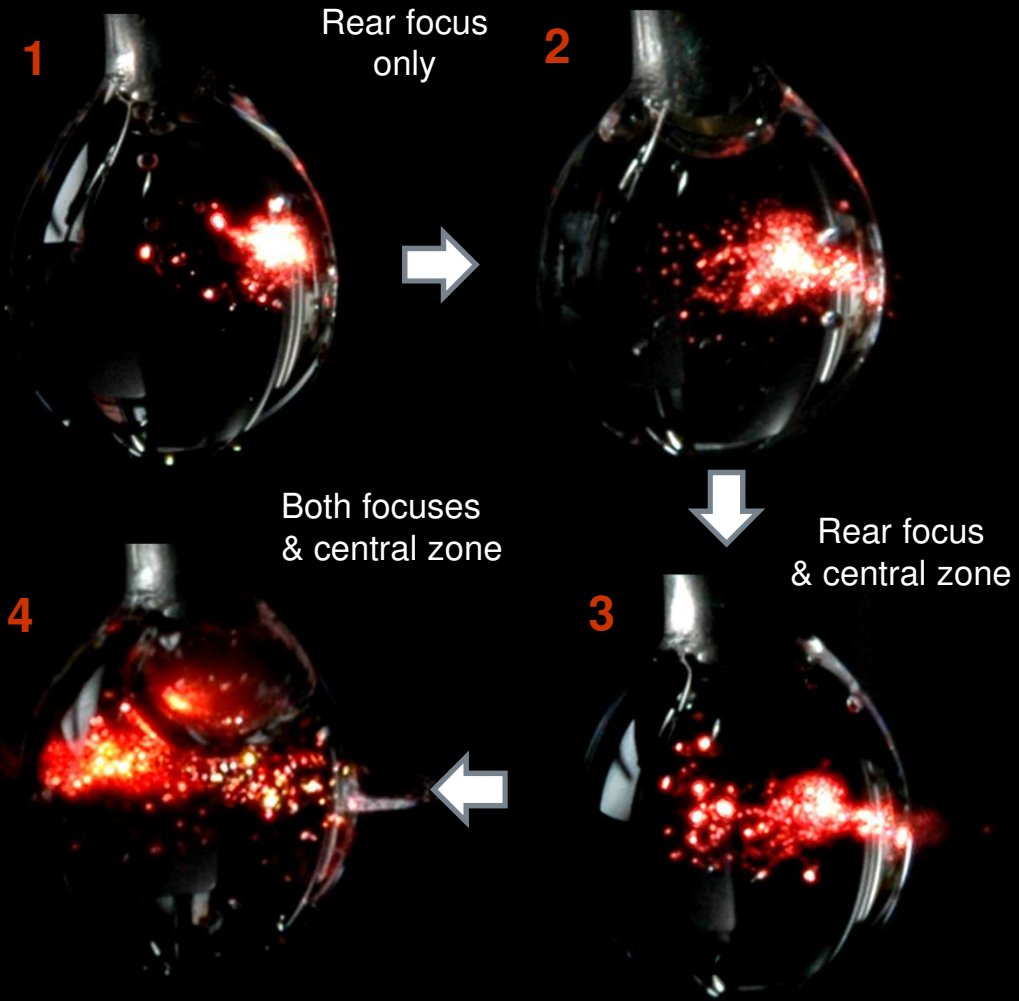
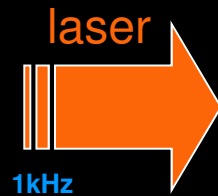
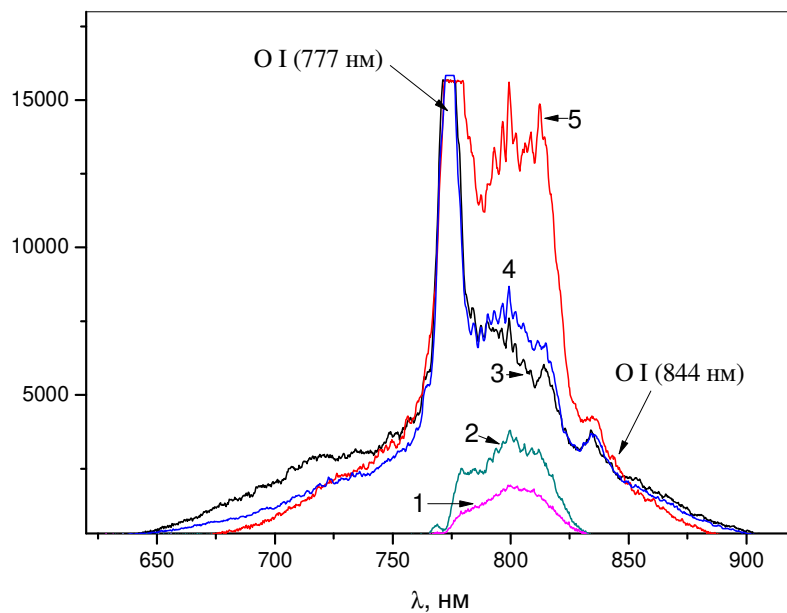
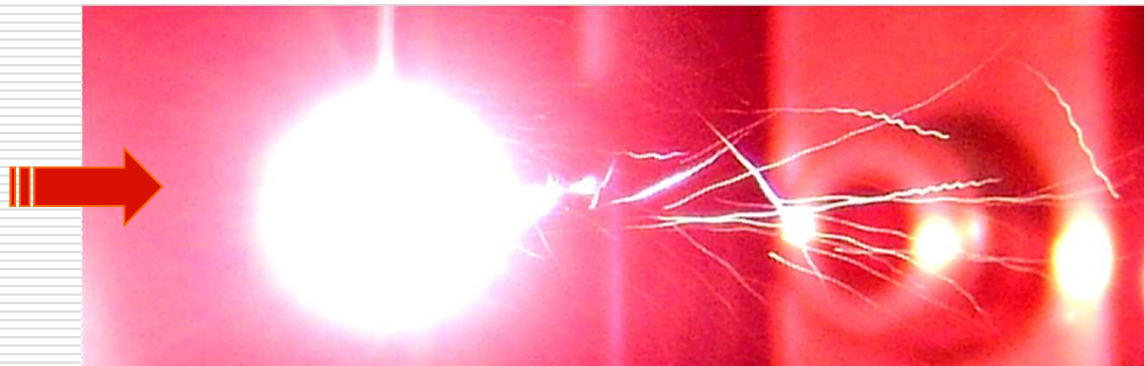
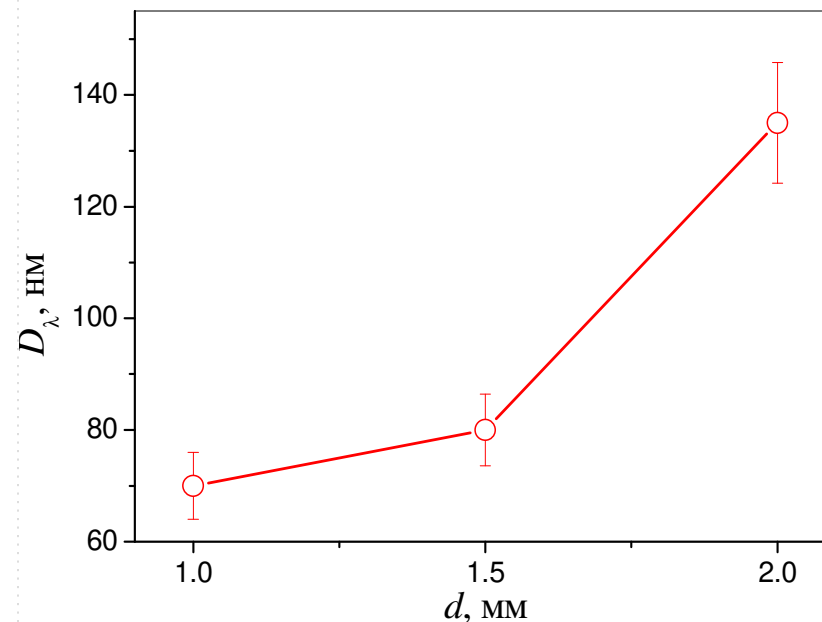


Photo exposition time 1/500 s

Спектры свечения водной капли, среднеквадратичная ширина спектра излучения от водных капель различного диаметра



Усредненные спектры свечения капли воды при различной длительности импульса падающего излучения $t_p = 800$ (1); 685 (2); 285 (3); 143 (4) и 55 фс (5).

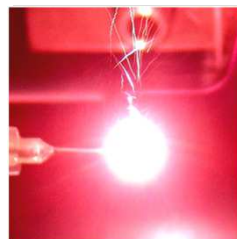
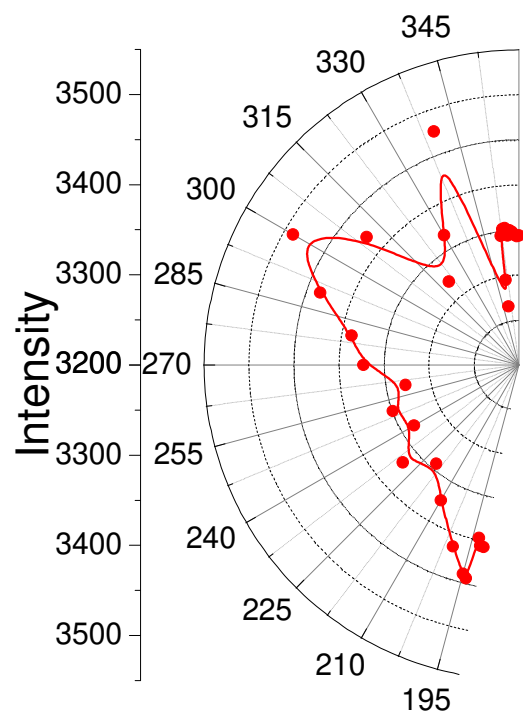


Среднеквадратичная ширина спектра излучения от водных капель различного диаметра.

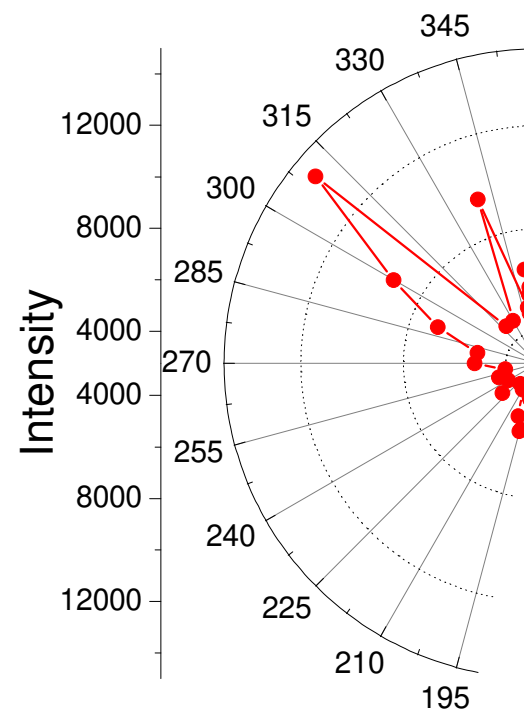
Увеличение мощности импульса и размера водной частицы при прочих равных условиях сопровождается дополнительным **уширением спектра** наблюдаемого рассеянного излучения.

Угловое распределение свечения капли

Spectral range: 450-600 nm



Spectral range: 600-1100 nm

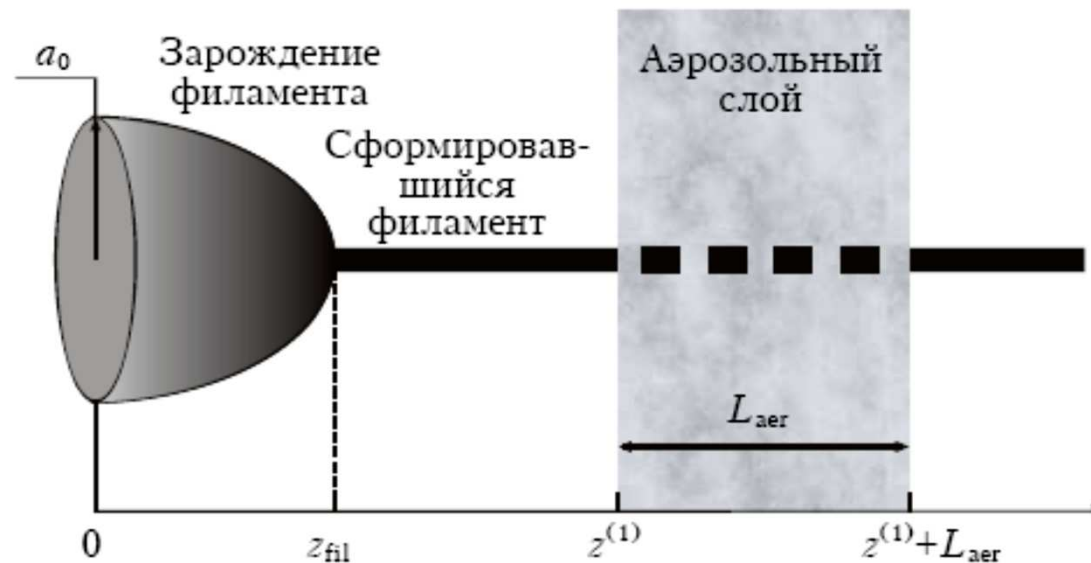


Угловое распределение этой видимой эмиссии в общем случае неоднородно и напоминает излучение электрического **мультиполя**.



Филамент в водном аэрозоле

Каково влияние микронных частиц на динамику и характеристики филаментации фемто-импульса ?

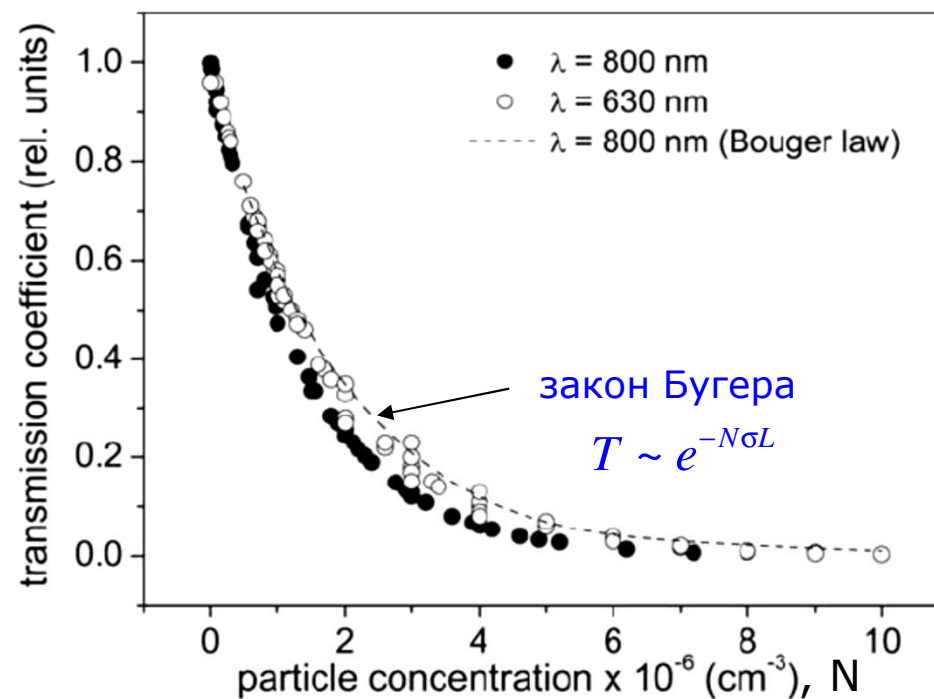


Самовосстановление филамента

Филамент устойчив к актам рассеяния на отдельных частицах.

Энергетическое ослабление УКИ в тумане

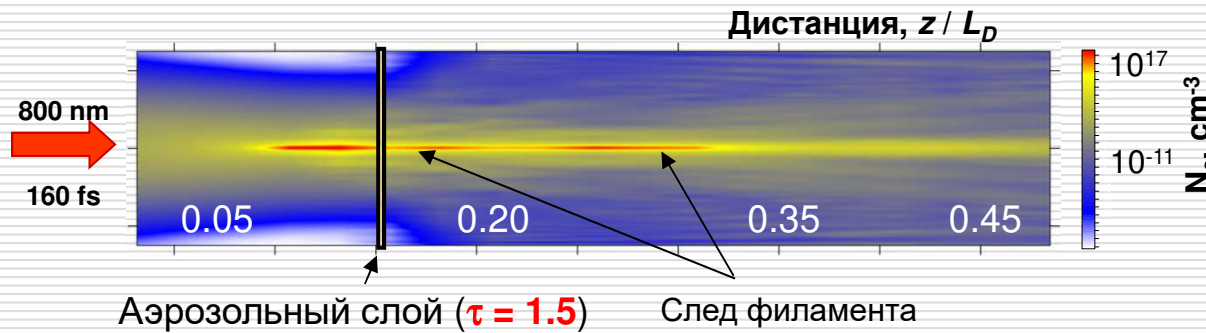
Эксперименты со слоем аэрозоля



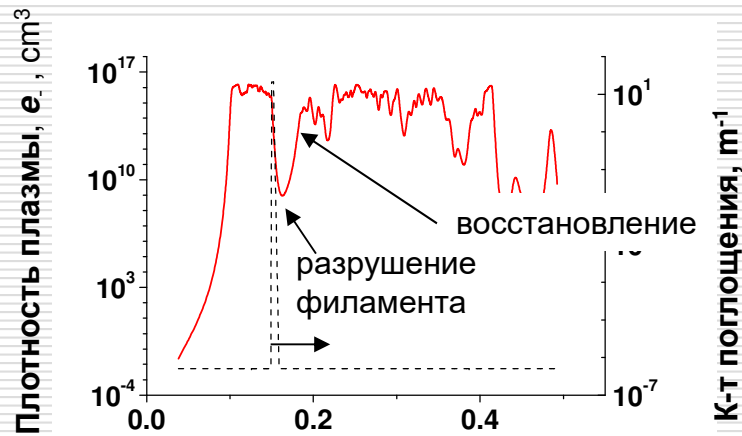
Водный аэрозоль действует на мощное фемтосекундное излучение как **линейный ослабитель**, приводя к экспоненциальному падению пропускания от оптической толщи.

Эффект **самовосстановления** светового филамента в облаке.

Модельный расчет



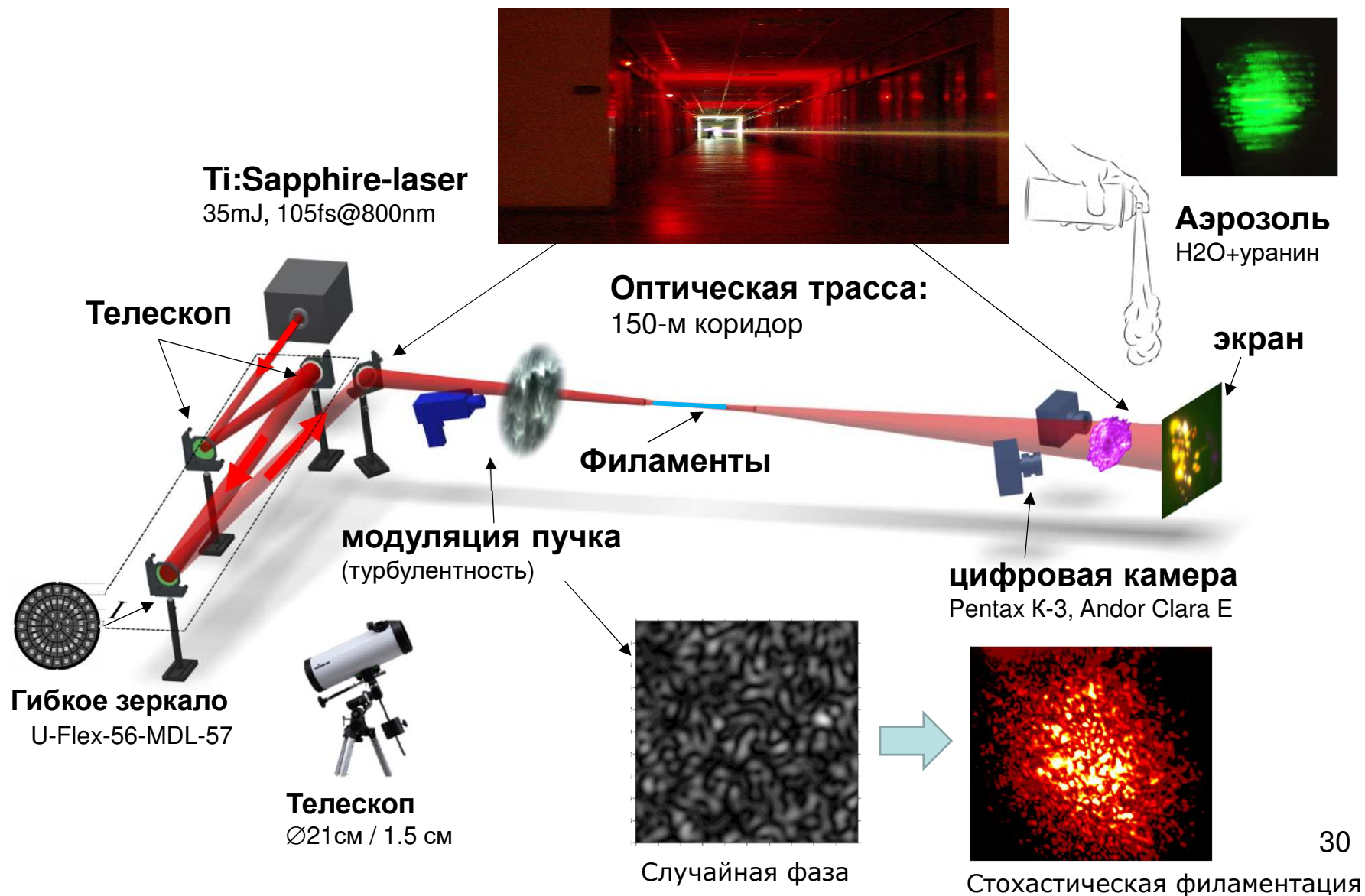
Профиль концентрации Электронов в плазменном следе при филаментации лазерного импульса в присутствии тонкого поглощающего аэрозольного слоя.



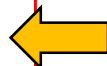
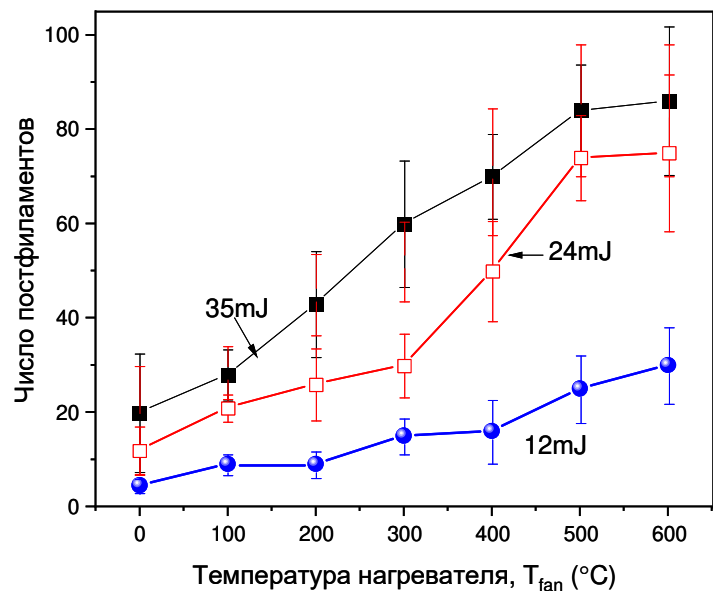
Пиковая плотность плазмы после прохождения 160-фс лазерного импульса через тонкое облако.

- Филамент **самовосстанавливается** после тонкого слоя аэрозоля.
- Это связано с **динамическим восполнением** его энергии из периферийных зон пучка.

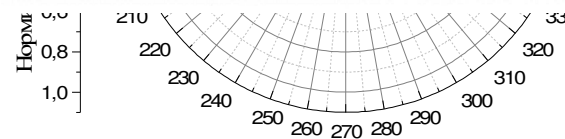
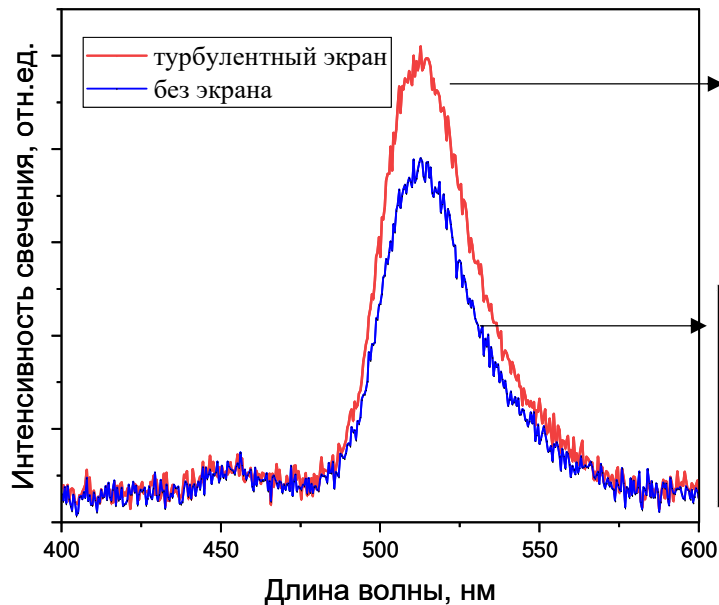
Нелинейная Флуоресценция Аэрозоля при Стохастической Лазерной Филаментации



Число «горячих точек»



Интенсивность свечения частиц





АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ АВТОРА

ГЕЙНЦ ЮРИЙ ЭЛЬМАРОВИЧ *

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, распространение волн (Томск)
SPIN-код: 9509-3695, AuthorID: 29115

ОБЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Название показателя	Значение
? Число публикаций на elibrary.ru	431
? Число публикаций в РИНЦ	425
? Число публикаций, входящих в ядро РИНЦ	374
? Число цитирований из публикаций на elibrary.ru	2806
? Число цитирований из публикаций, входящих в РИНЦ	2740
? Число цитирований из публикаций, входящих в ядро РИНЦ	2583
? Индекс Хирша по всем публикациям на elibrary.ru	24
? Индекс Хирша по публикациям в РИНЦ	23
? Индекс Хирша по ядру РИНЦ	23
? Число публикаций, процитировавших работы автора	1277
? Число ссылок на самую цитируемую публикацию	107
? Число публикаций автора, процитированных хотя бы один раз	289 (68,0%)
? Среднее число цитирований в расчете на одну публикацию	6,28



Заключение

Проведен цикл экспериментальных и теоретических работ по исследованию взаимодействия МФЛИ с газовой и аэрозольной составляющими атмосферы.

Совместно с рядом научных организаций РАН (ФИАН, ИПФ РАН, ИСЭ СО РАН, ИС РАН, ИАПУ ДВО РАН) и Минобра (МГУ, ТГУ) экспериментально и теоретически исследованы **новые эффекты** филаментации:

- Формирование **минифиламентов** в остром фокусе (диаметром <5 мкм).
- **Направленная эмиссия суперконтинуума** филаментов из миллиметровых водных **капель**
- **Самовосстановление** филамента в **облаке**
- **Управляемая структурная** множественная филаментация;
- **Усиление генерации ТГц** излучения и нелинейной **флуоресценции** при стохастической филаментации в воздухе



СПАСИБО за ВНИМАНИЕ