



Тема 3

Физическая картина филаментации

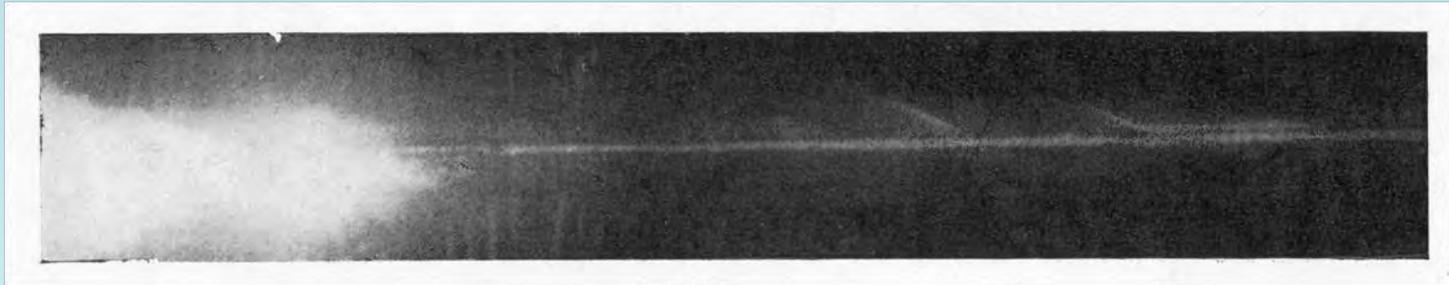
§ 3 Физическая картина явления филаментации

- 3.1. Первые эксперименты по самофокусировке пучков и филаментации импульсов**
- 3.2. Сценарий филаментации.
Керровская и плазменная нелинейности.**
- 3.3. Насыщение интенсивности в филаменте. Баланс керровской фокусировки и дефокусировки в плазме.
Оптическая сила нелинейных линз.**
- 3.4. Аберрационная дефокусировка и
кольцевые структуры в филаменте**
- 3.5. Модель движущихся фокусов**
- 3.6. Рефокусировка импульса.**
- 3.7. Резервуар энергии.**

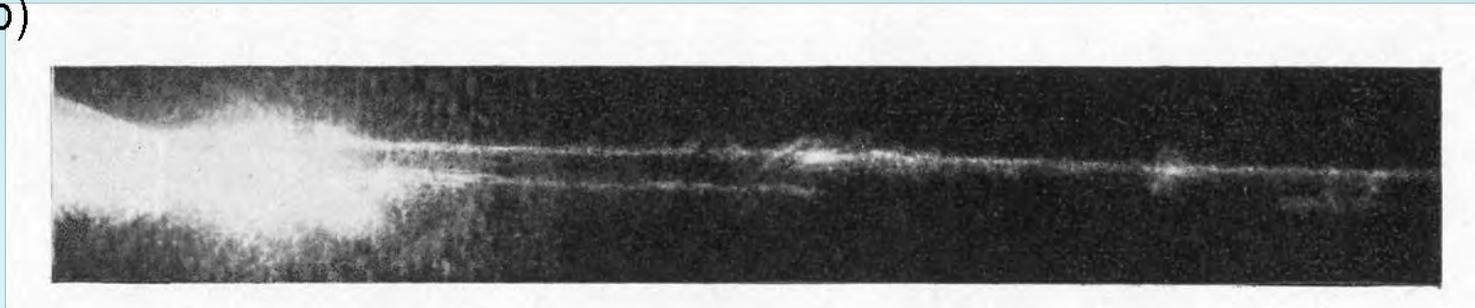
Первый эксперимент по наблюдению самофокусировки лазерного пучка

“...Самософокусированное в узкую нить излучение лазера оставляло на фотобумаге, укрепленной с торца кюветы, четкий след в виде точки...”

a)



b)



Светящиеся каналы при фокусировке наносекундных импульсов на длине волны 1,06 мкм мощностью 20 мВт в кювету с циклогексаном (a), ортоксилолом (b).

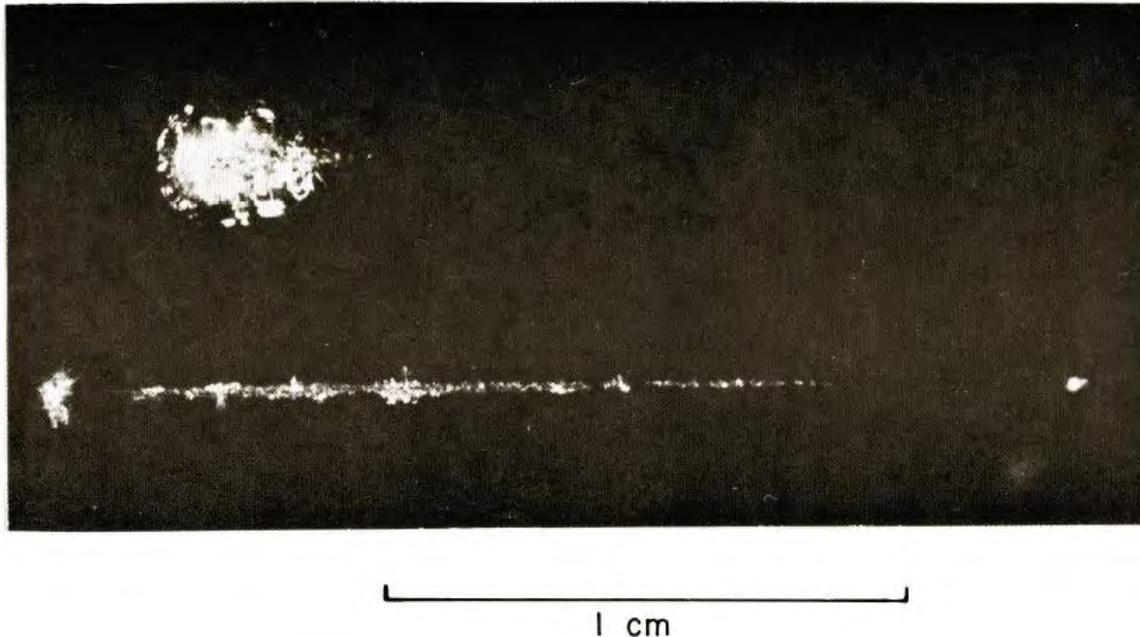
Радиус фокусировки 28 мм, длина филамента около 5 см.

Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р., Письма в ЖЭТФ, (1965)

3.1.

**Характерные разрушения
в стекле при различной фокусировке пучка
0,1 Дж, 10 МВт, ~10 нс**

M. Hercher "Laser-induced Damage in Transparent Media"



Вверху: короткофокусная линза с $f/6$, внизу – длиннофокусная с $f/20$

**Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects,
Editors: Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y. R.
Topics in Applied Physics, 114, Springer, 2008, P.279**

Самофокусировка пучка в воздухе

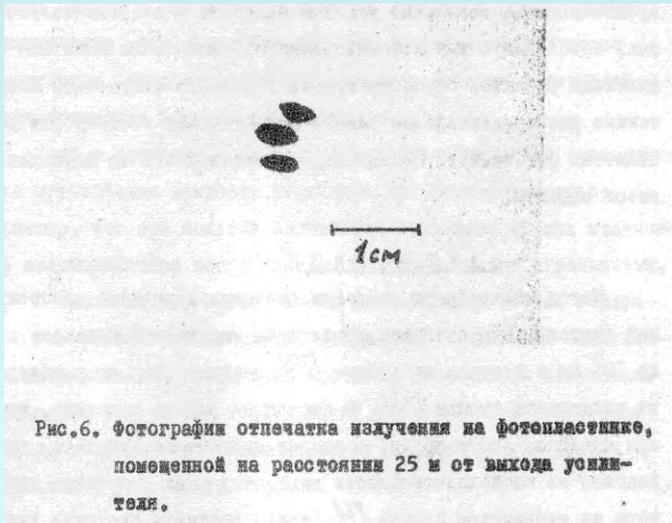
сходящийся пучок

Korobkin V.V., Alcock A.J. Phys. Rev. Lett., v. 21, 1433 (1968)

коллимированный пучок (10^{12} Вт, 20 пс, 1,06 мкм)

Басов Н.Г., Крюков Н.Г., Сенатский Ю.В., Чекалин С.В.

Препринт ФИАН СССР № 91 (1969); ЖЭТФ (1969)



Пятно столь малых размеров не может быть получено даже при дифракционной расходимости пучка диаметром $\sim 0,5$ мм. Угловая расходимость излучения $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ рад

Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. "Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air", Opt. Lett., v. 20, 73 (1995).

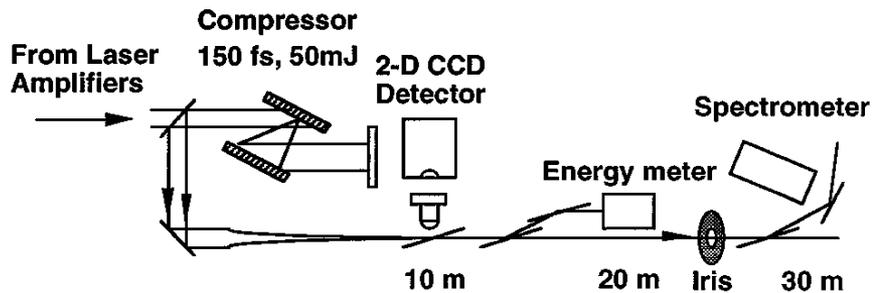
Первые эксперименты по филаментации импульсов -1

Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air

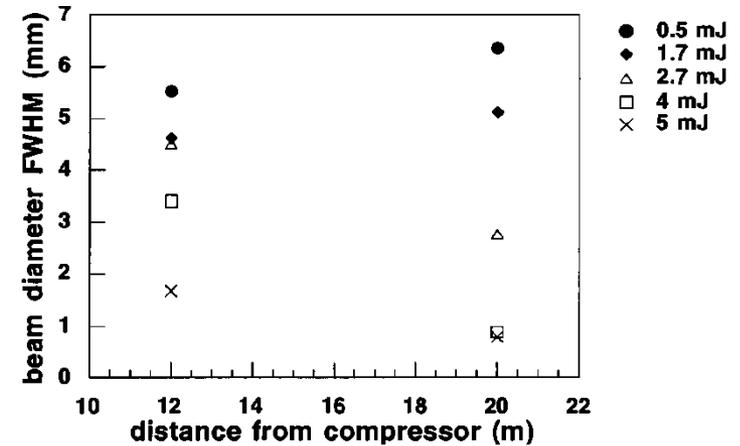
A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G. Mourou

Optics Letters, 20, 73, 1995 - USA

Импульс; 775 нм, 200 фс, 5÷15 мДж,
диаметр пучка 4 мм.



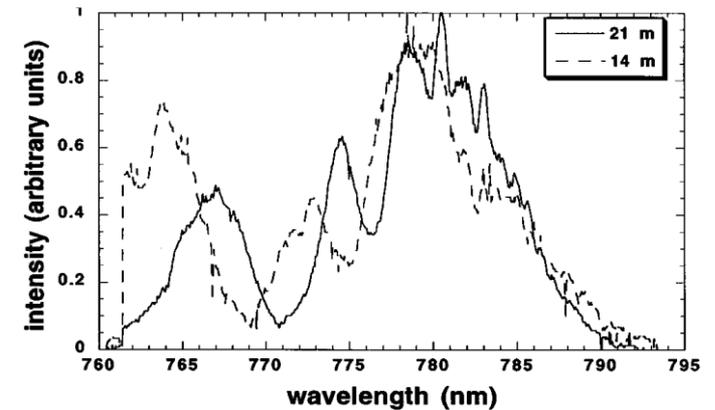
Диаметр пучка



Экспериментальная оценка пиковой интенсивности в филаменте $7 \cdot 10^{13}$ Вт/см².

$$N_e = 4,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

Спектр импульса

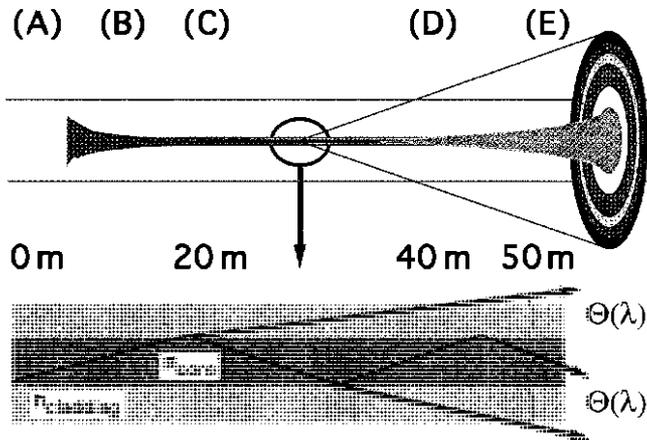


Первые эксперименты по филаментации импульсов -2

Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air

E. T. J. Nibbering, P. F. Curley, G. Grillon, B. S. Prade, M. A. Franco, F. Salin, A. Mysyrowicz
Optics Letters, 21, 62, 1996 - France

Импульс: 800 нм, 150 фс, 4÷8 мДж, диаметр пучка 30 мм



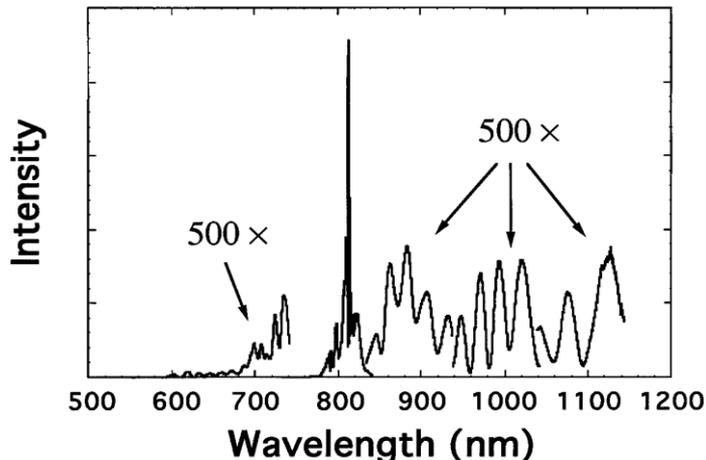
Филамент – это антиволновод с сердцевиной, которую образует плазма с $\Delta n_{pl} < 0$ ($\approx 10^{-5}$), и оболочкой с $\Delta n_{kr} > 0$ ($\approx + 10^{-5}$), которую наводит керровская нелинейность.

Квазистабильная утекающая мода существует в таком антиволноводе.

Импульс может распространяться на большое расстояние в виде утекающей моды.

Энергия в филаменте 0,7÷1,0 мДж, его диаметр 80 ÷ 100 мкм, длительность 150 ÷ 180 фс.

Спектр на длине 30 м.



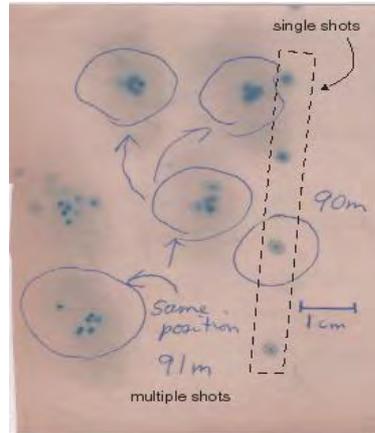
Коническое излучение – это Черенковское излучение импульса, который распространяется в сердцевине с фазовой скоростью $v > c_0/n$, где n – показатель преломления воздуха.

Первые эксперименты по филаментации импульсов -3

Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air
 Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P.
 Optics Letters, 22, 304 1997 - Canada

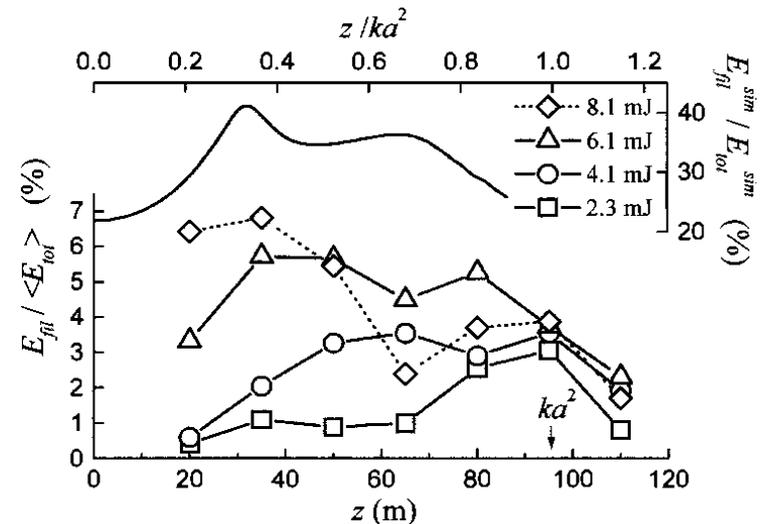
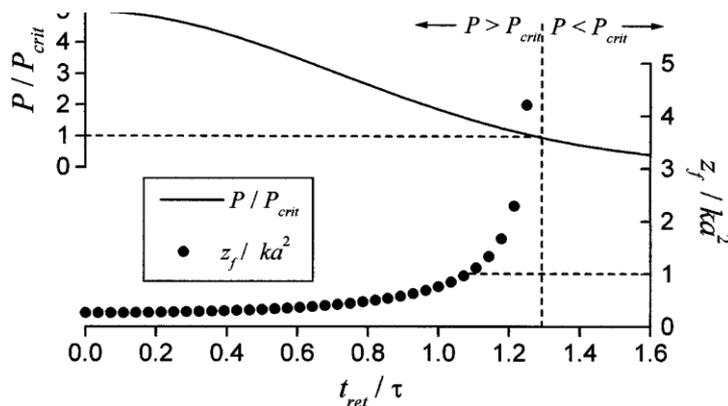
Импульс: 800 нм, 230 фс, 2,3÷8,1 мДж, 9,4÷33 ГВт, радиус пучка 3,5 мм

Изображение
 плотности энергии в
 филаменте,
 зарегистрированное
 на расстоянии 90 м.

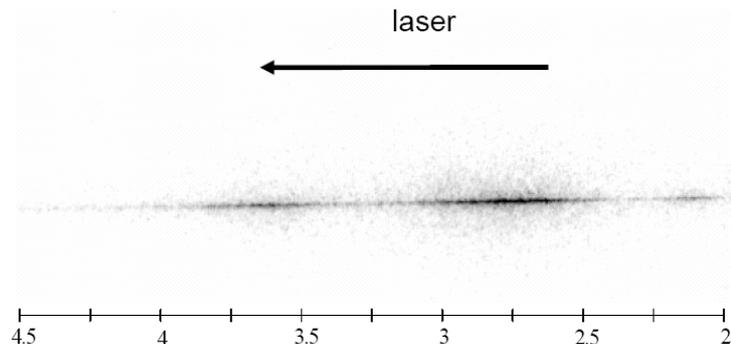


Рефокусировка импульса.
 Изменение с расстоянием
 энергии в филаменте.

Модель движущихся фокусов
 Расстояние самофокусировки
 различных слоев импульса



Изображения филамента



В воздухе
Фемтосекундный импульс
800 нм, длительность 45 фс
энергия 13 мДж, 10 Гц
фокусировка $F=5$ м

Can. J. Phys. 2005



а) 200 μm



б) 200 μm

В плавленом кварце
Фемтосекундный импульс:
800 нм, 130 фс, 1 КГц, $F=100$ мм
длинноэкспозиционное (2 мин)
изображение филамента (а)
показателя преломления (б)

Opt. Lett. 2001

а)



В циклогексане
Наносекундный импульс
на длине волны 1,06 мкм,
мощностью 20 МВт

Письма в ЖЭТФ 1965

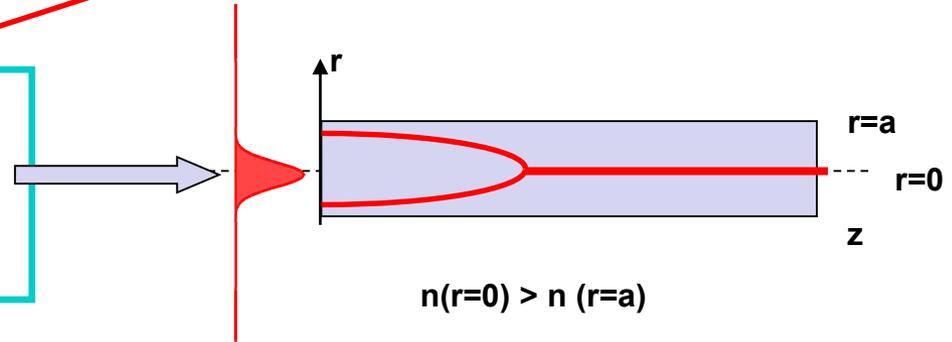
3.2. Сценарий филаментации. Керровская и плазменная нелинейности

Зарождение филамента. Роль Керровской нелинейности

$n = n_0 + n_2 I$, где n_2 – коэффициент кубичной нелинейности,
 I – интенсивность, A – комплексная амплитуда светового поля

самофокусировка пучка

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp} A + \frac{2k^2 n_2 I}{n_0} A$$



Ограничение роста интенсивности в фокусе
 Дефокусировка в наведенной лазерной
 плазме

$$z_{fil} = \frac{0,367 ka_0^2}{\left\{ \left[\left(\frac{P_0}{P_{cr}} \right)^{1/2} - 0,852 \right]^2 - 0,0219 \right\}^{1/2}}$$

$$\Delta n_p \approx -\frac{1}{2} \frac{\omega_p^2}{n_0 \omega^2}$$

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m_e}$$

Плазменная частота

Приращение показателя
 преломления в плазме

N_e – концентрация электронов в плазме.
 В воздухе $N_e = 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $\omega_p \sim 2 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}$,

Изменение распределения плотности энергии в филаменте с расстоянием

Филамент содержит 6-12% энергии импульса (10 мJ)
Его протяженность около 100 м.

