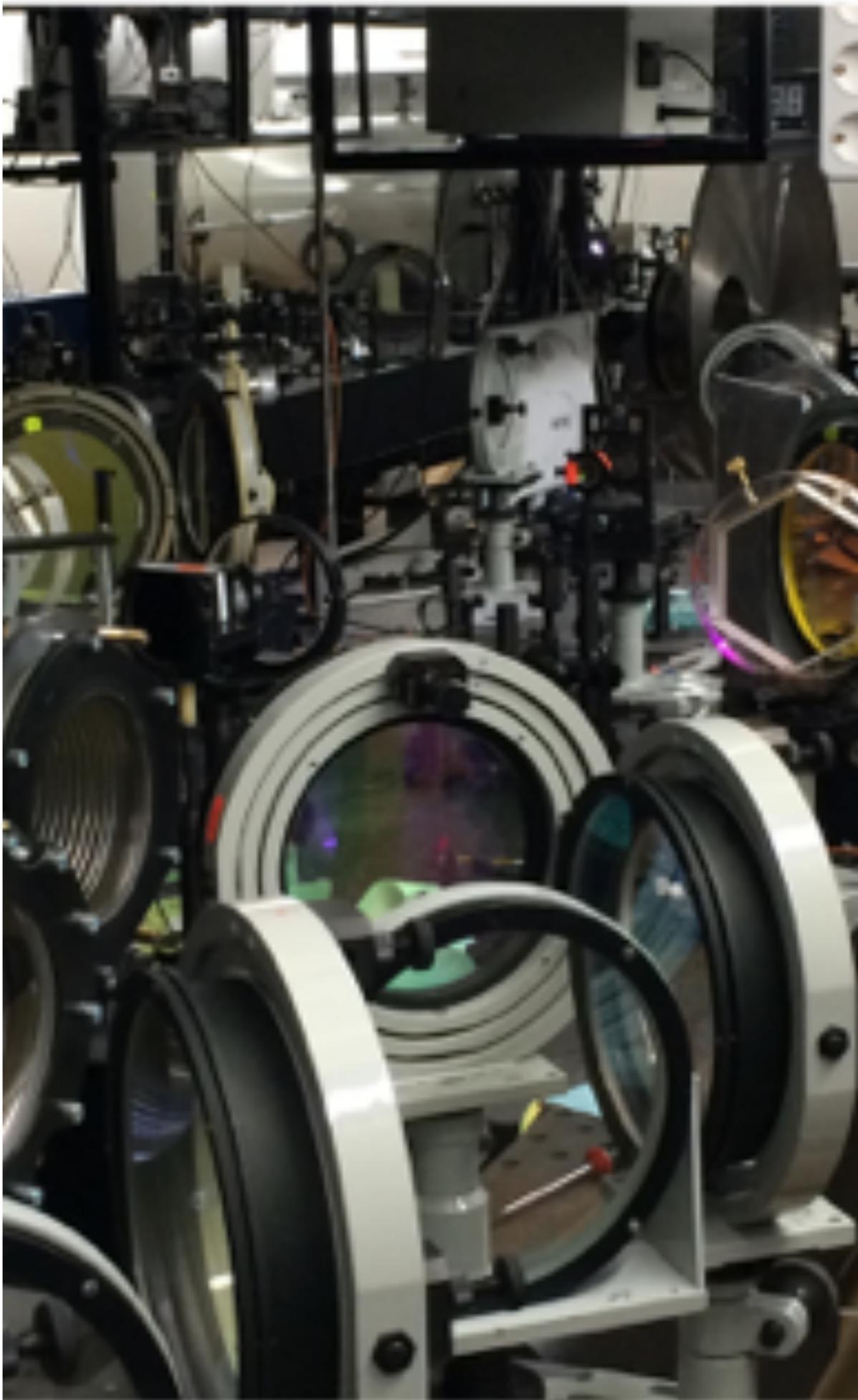


# ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ КОМПЛЕКС PEARL КАК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

---

*Соловьев Александр, ИПФ  
РАН*



## *Благодарность соавторам:*



Стародубцев М.В.<sup>1</sup>

Бурдонов К.Ф.<sup>1</sup>

Сладков А.Д.<sup>1</sup>

Коржиманов А.В.<sup>1</sup>

Гинзбург В.Н.<sup>1</sup>

Хазанов Е.А.<sup>1</sup>

Коробейникова А.П.<sup>1</sup>

Кочетков А.А.<sup>1</sup>

Кузьмин А.А.<sup>1</sup>,

Шайкин И.А.<sup>1</sup>

Шайкин А.А.<sup>1</sup>

Яковлев И.В.<sup>1</sup>

Степанов А.Н.<sup>1</sup>

Мурзанев А.А.<sup>1</sup>

Миронов С.Ю.

Корытин А.И.<sup>1</sup>

D.Kumar<sup>4</sup> et al.



S. N. Chen<sup>1,2</sup>

G. Revet<sup>2</sup>

J. Fuchs<sup>1,2</sup>

Пикуз С.А.<sup>3</sup>

Скobelев И.Ю.<sup>3</sup>

Рязянцев С.Н.<sup>3</sup>

Алхимова М.А.<sup>3</sup>

Филиппов Е.Д.<sup>3</sup>

Пикуз Т.А.<sup>3</sup>

A. Chiardi<sup>4</sup>

B. Khiar<sup>4</sup>

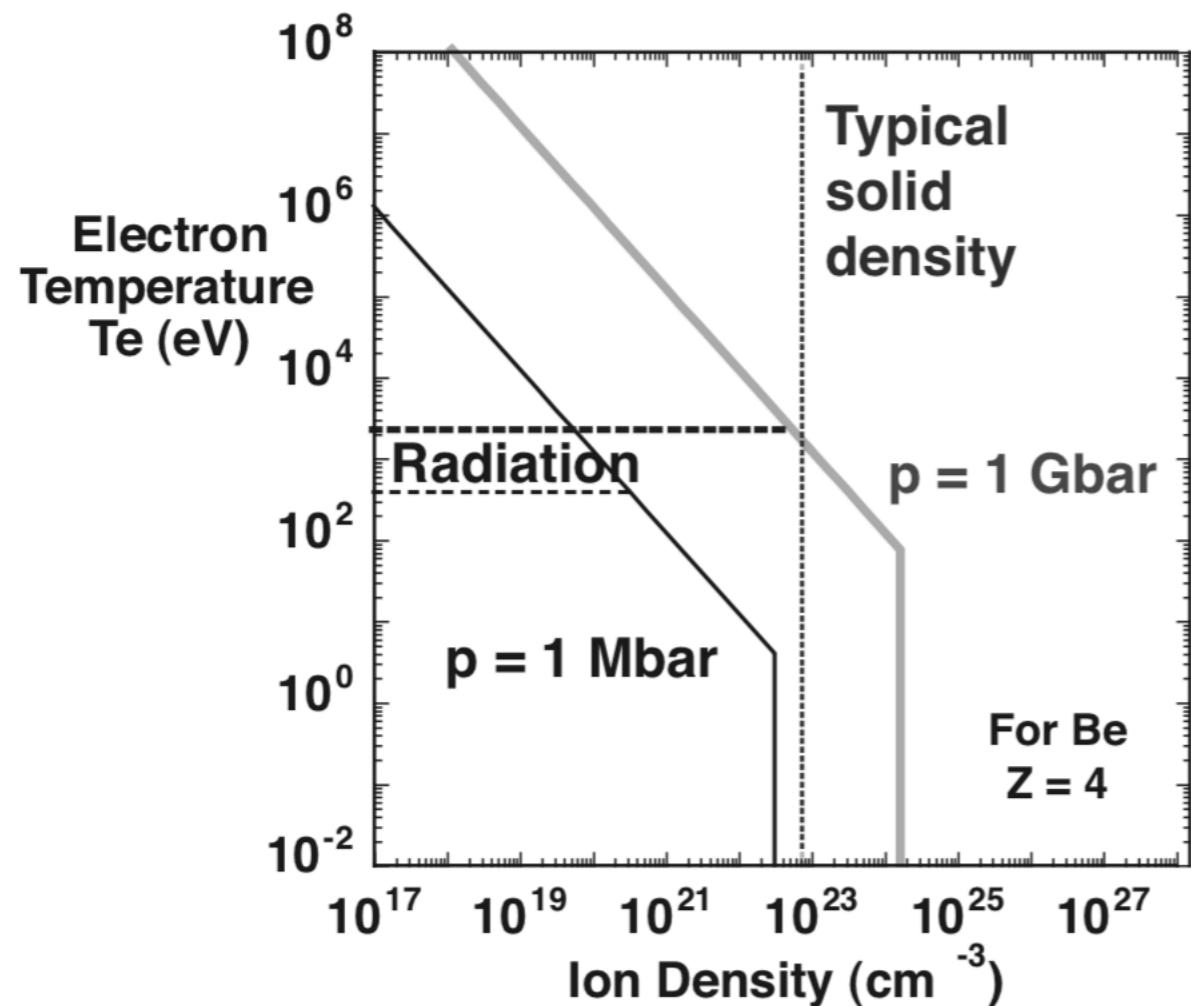
К.Л. Губский

А.П. Кузнецов

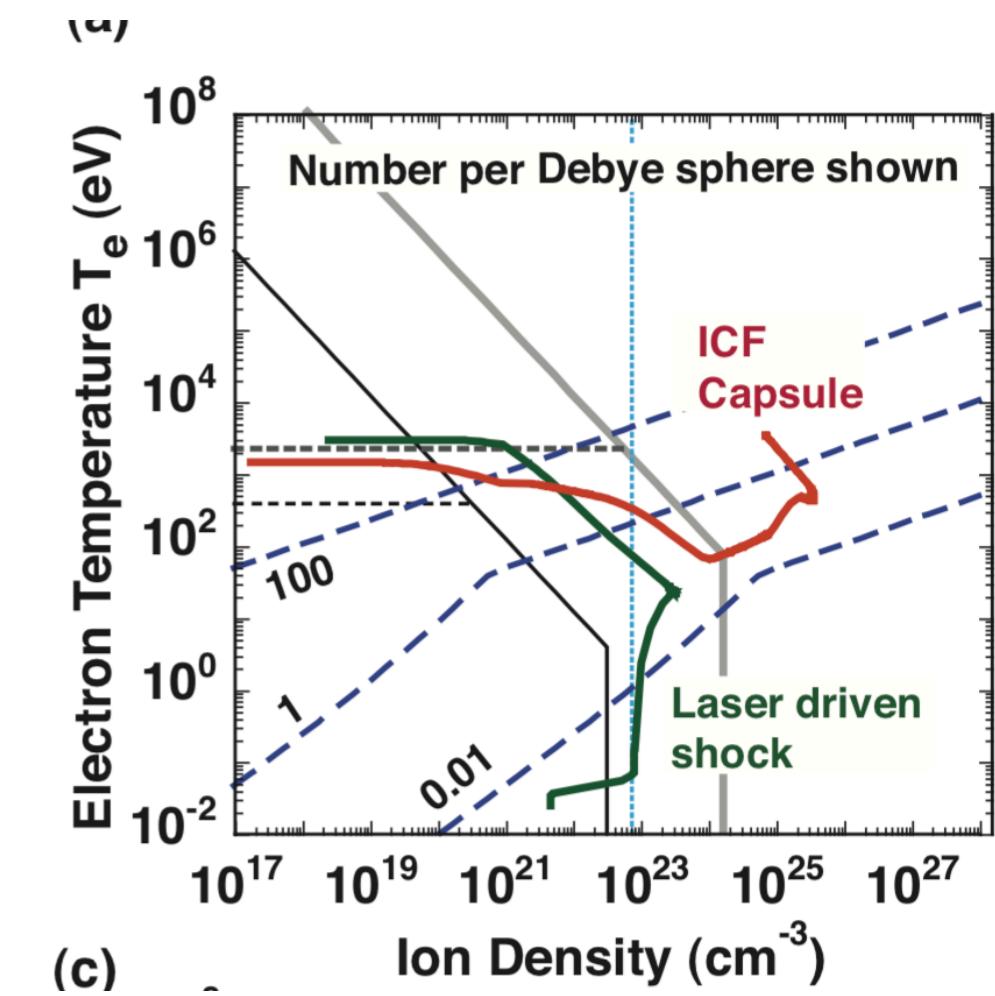
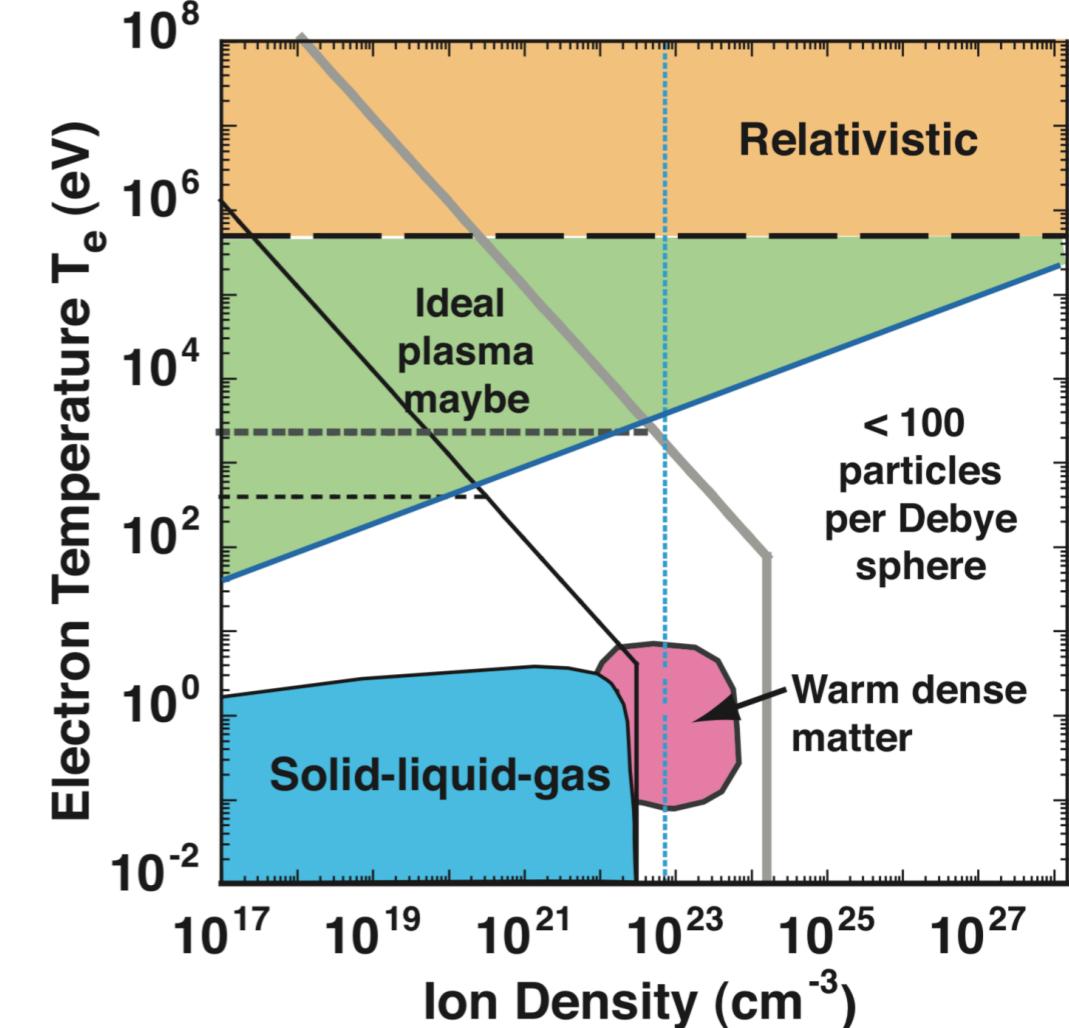
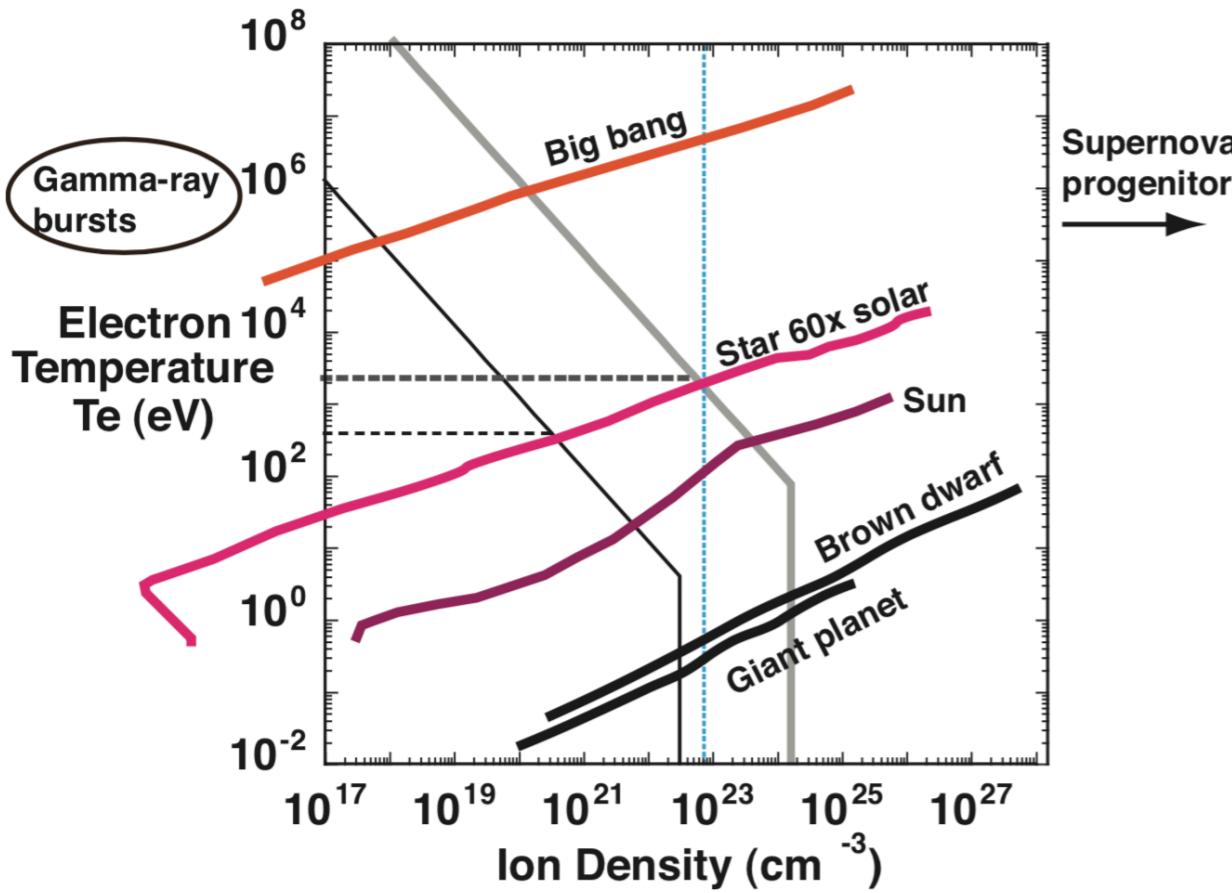
# КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

---

- High Energy Density - достижимость в современном эксперименте
- Экспериментальные условия PEARL
- Примеры экспериментов
- Потенциальные режимы взаимодействия, приводящие к HED
- Необходимая модернизация лазерного комплекса



Phys. Plasmas 16, 055501 (2009)



*Экспериментальные условия,  
достигимые на PEARL*

*Пиковая мощность  
фемто-импульса  
до 0.4 ПВт. (18Дж, 45фс, 910нм)*

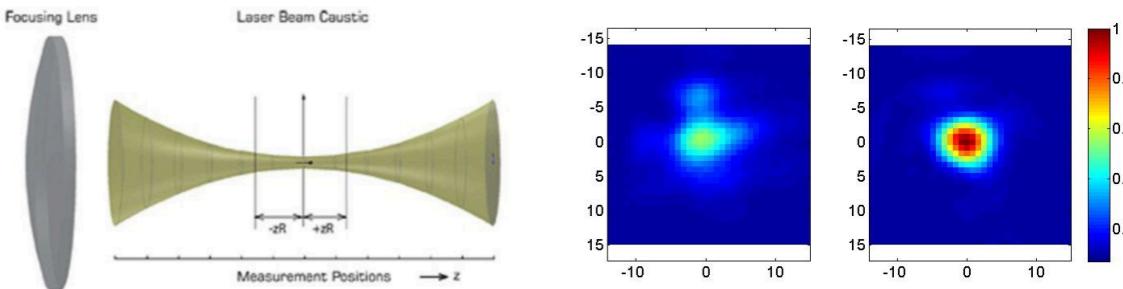


*Интенсивность  $\sim 10^{21}$  Вт/см $^2$  при F/2,  
диаметр пятна фокусировки 2,5-3 мкм.*

*Длина перетяжки около 10 мкм.*

*до  $\sim 10^{22}$  Вт/см $^2$  при более острой фокусировке F/0.7*

*Пологая фокусировка F/40 -  
диаметр пятна 50 мкм,  
длина перетяжки -15 мм*



*1054нм@2w - 1 нс - до 180 Дж. (300Дж@1w) джиттерк к сигналу 50нс.*

*Магнитное поле объемом порядка нескольких кубических сантиметров и  
амплитудой до 20 Т.*

# ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕННЫХ РЕЛЕВАНТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

---

1. *LWFA (Ускорение электронов в плазменном кильватере оптического драйвера)*
2. *TNSA (Ускорение протонов)*
3. *Ре-фокусировка эллипсоидальным плазменным зеркалом*
4. *Лабораторная астрофизика.*

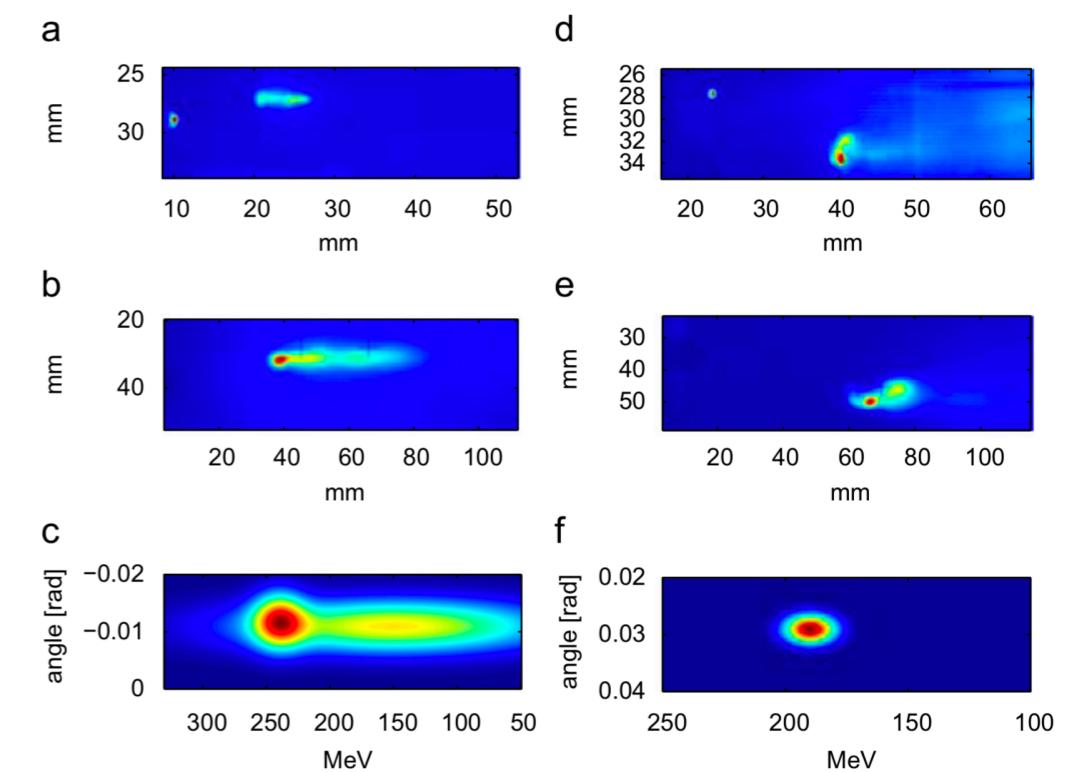
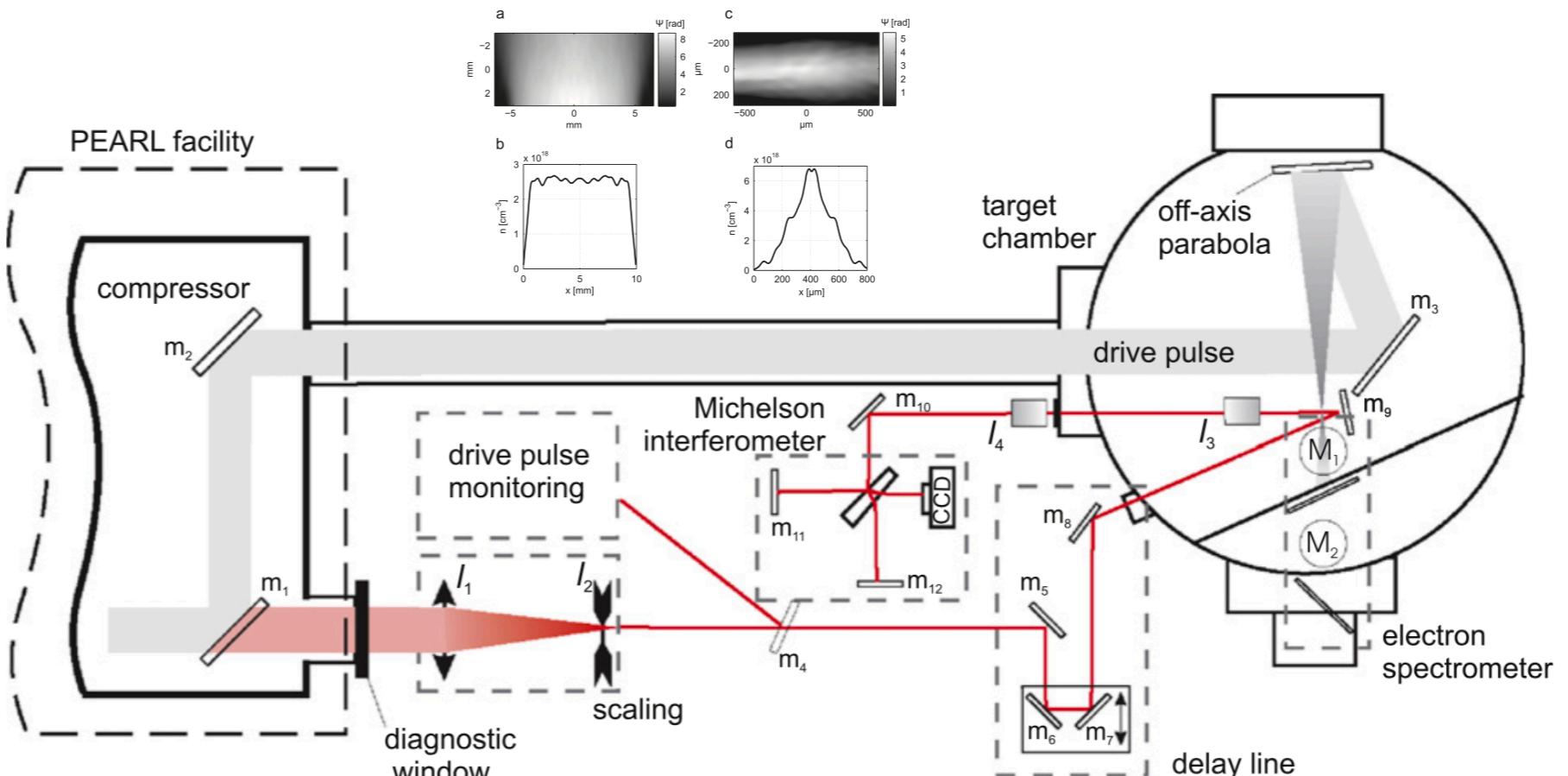
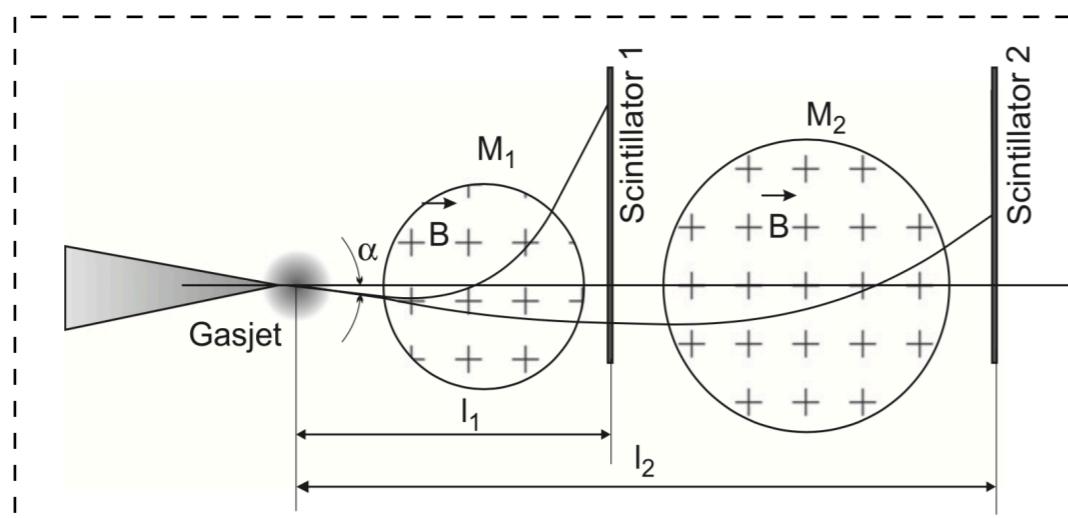
# УСКОРЕНИЕ В ПЛАЗМЕННОМ КИЛЬВАТЕРЕ ОПТИЧЕСКОГО ДРАЙВЕРА

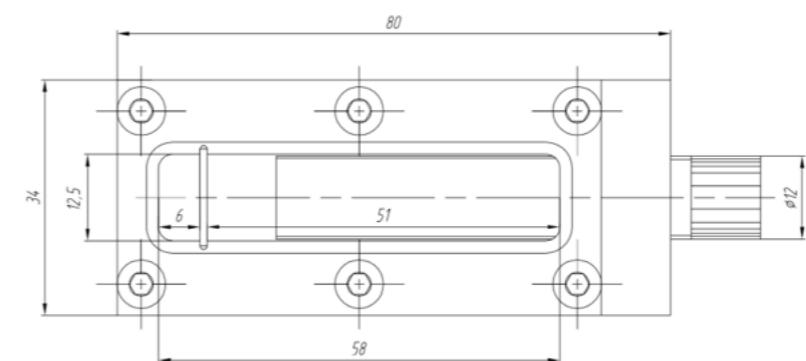
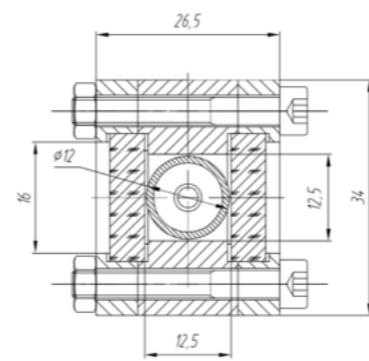
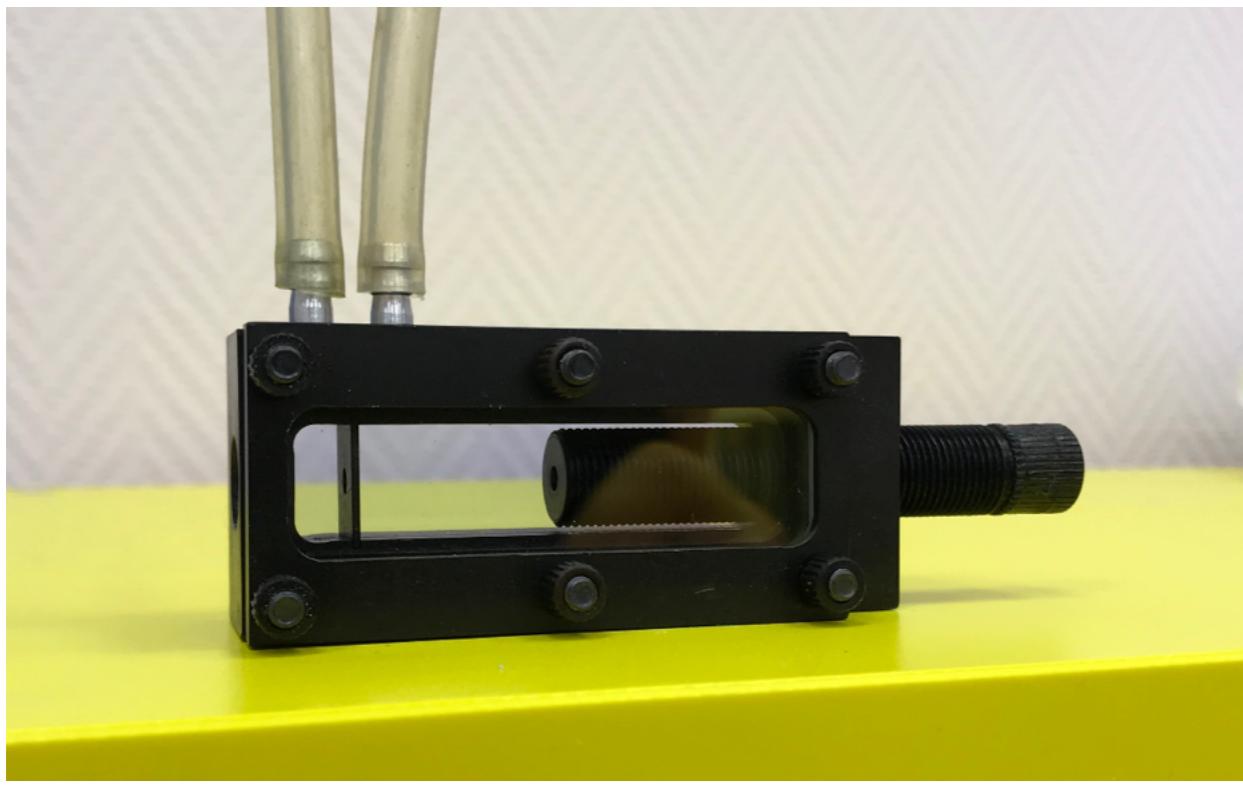
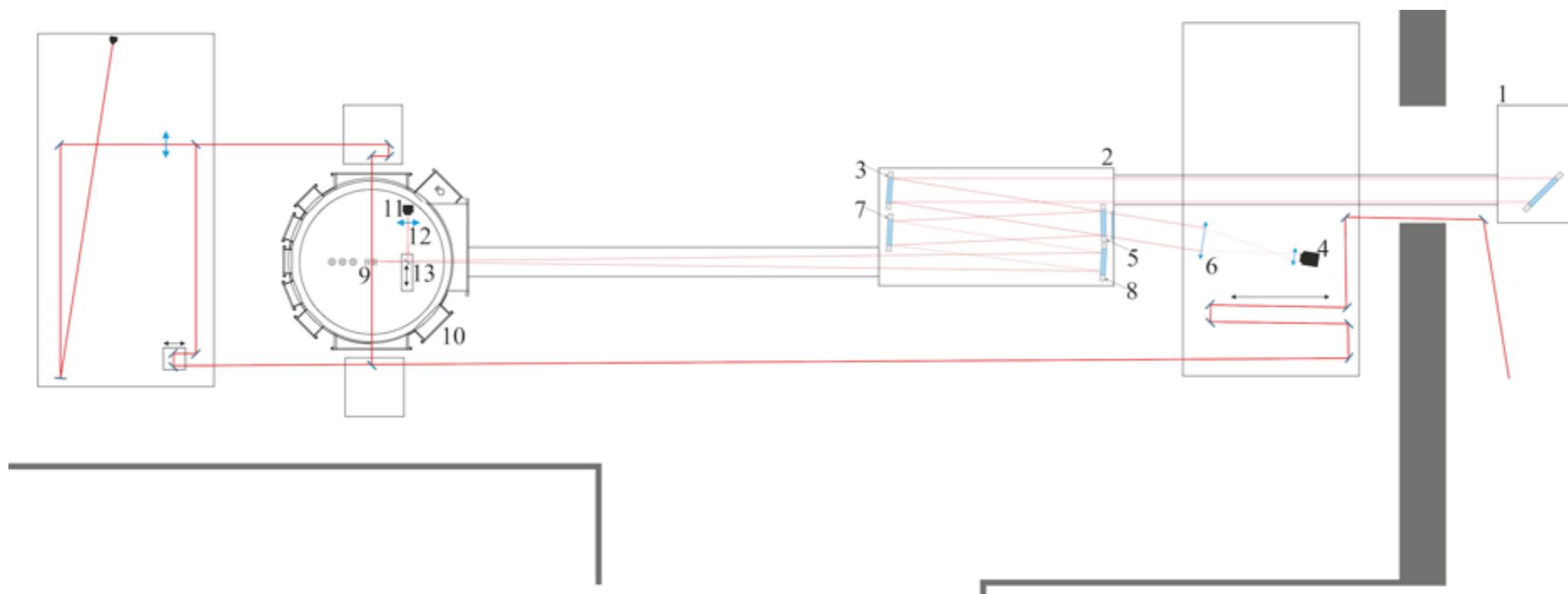
LWFA

$270 \text{ MeV}$

$300 \text{ nKл}$

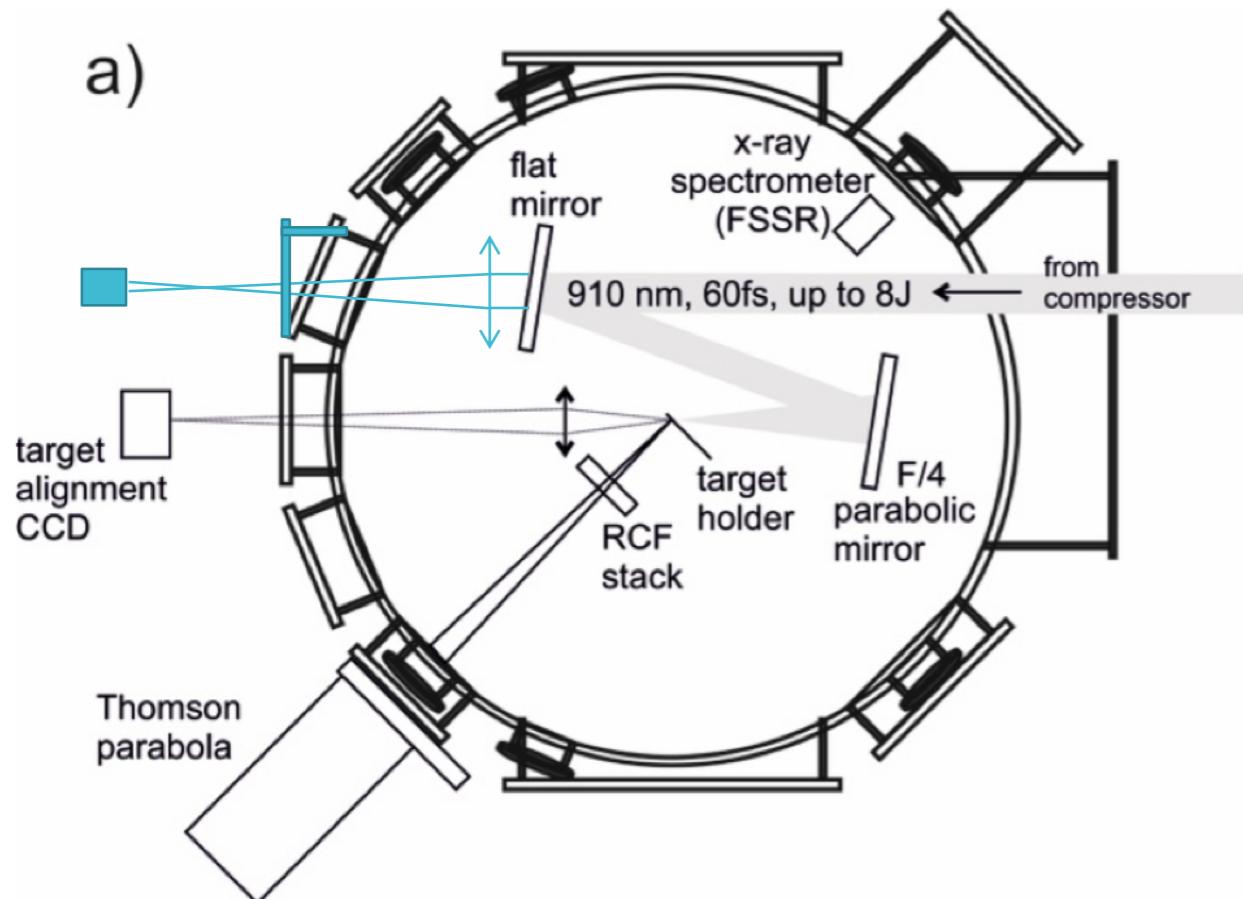
( $\sim 2 \cdot 10^9$  электронов)





# ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ

## TNSA

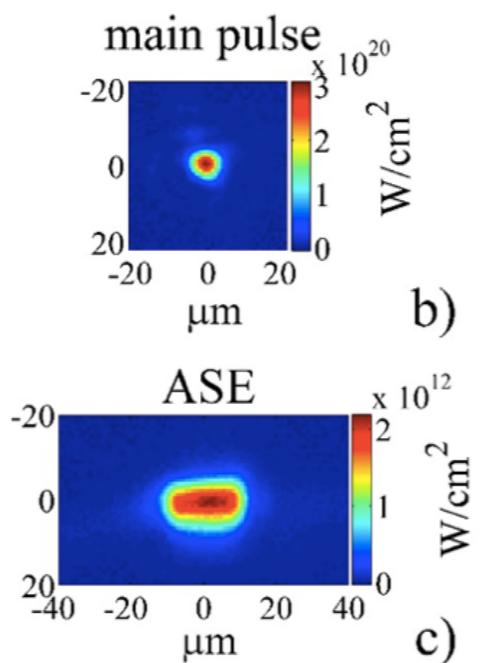
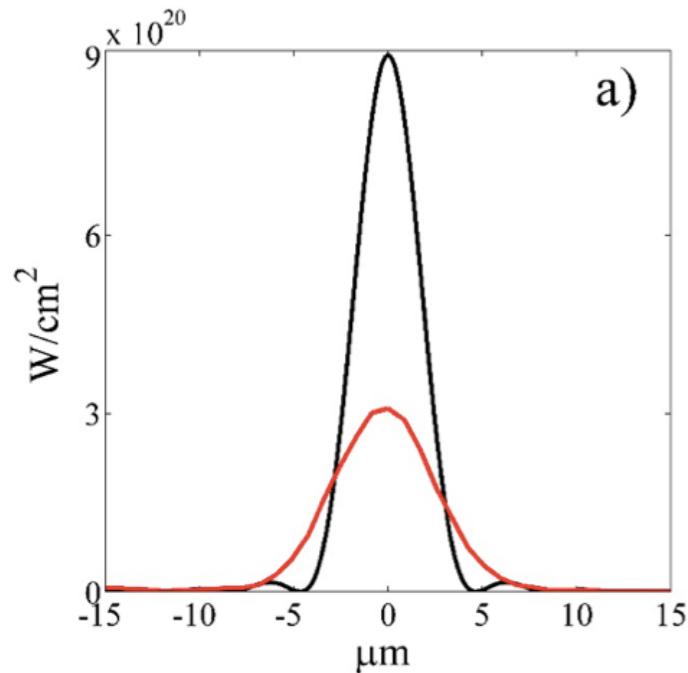


Basic laser parameters:  
 $\lambda_0 \approx 910 \text{ nm}, \tau \approx 60 \text{ fs},$   
 $E \approx 10 \text{ J},$   
 $P \approx 160 \text{ TW}$   
 $D \approx 100 \text{ mm}, F/4.2,$   
 $I \approx 3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$   
 $C \approx 2 \times 10^8 \text{ (1 ns)}$   
1 Shot/20min

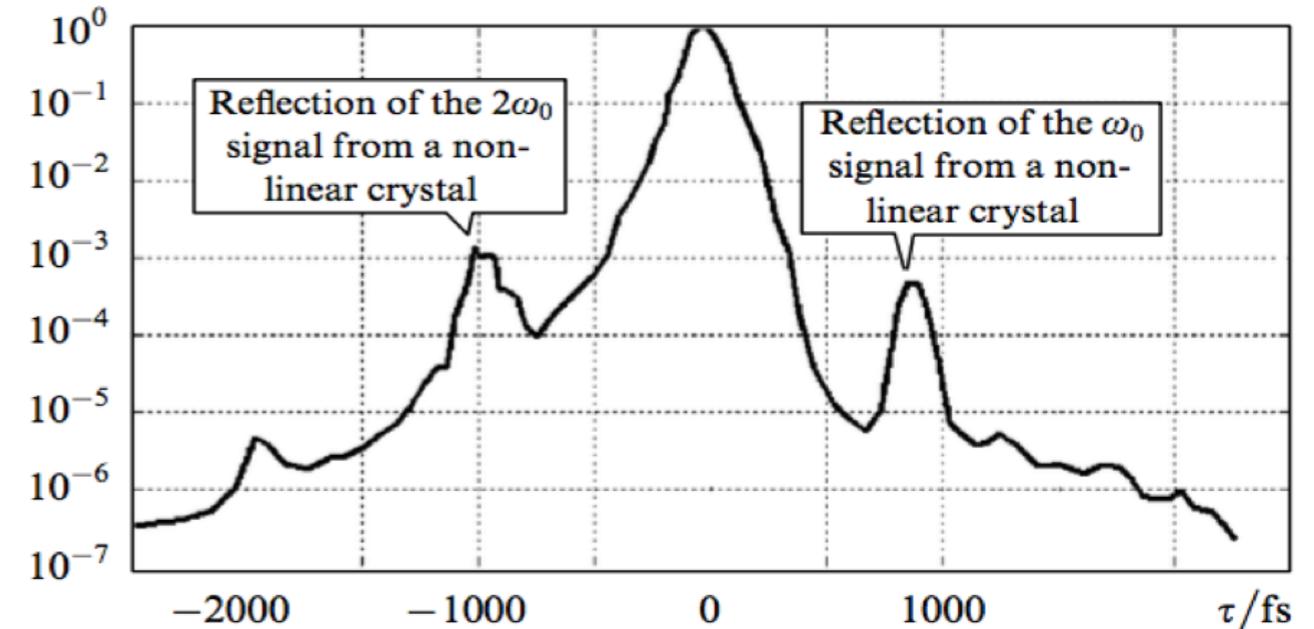
List of diagnostic equipment:

- Thomson parabola
- RCF stack
- FSSR X-ray spectrometer

## Focusing & contrast of the laser pulse



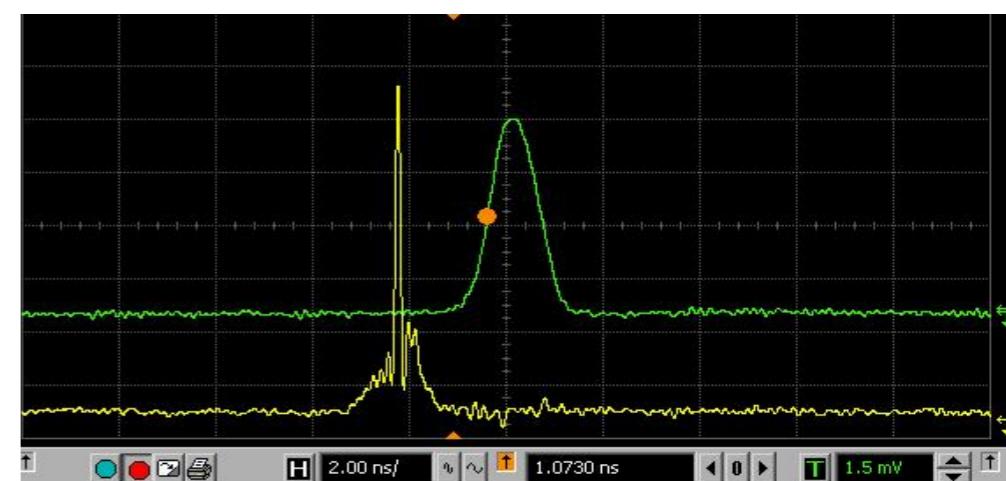
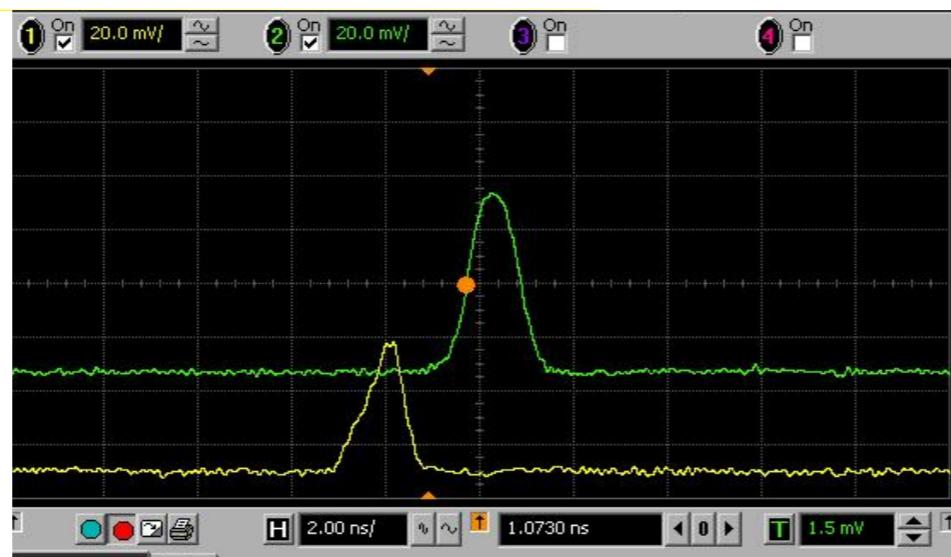
$I$  (rel. units)



Pic. Power contrast Mironov

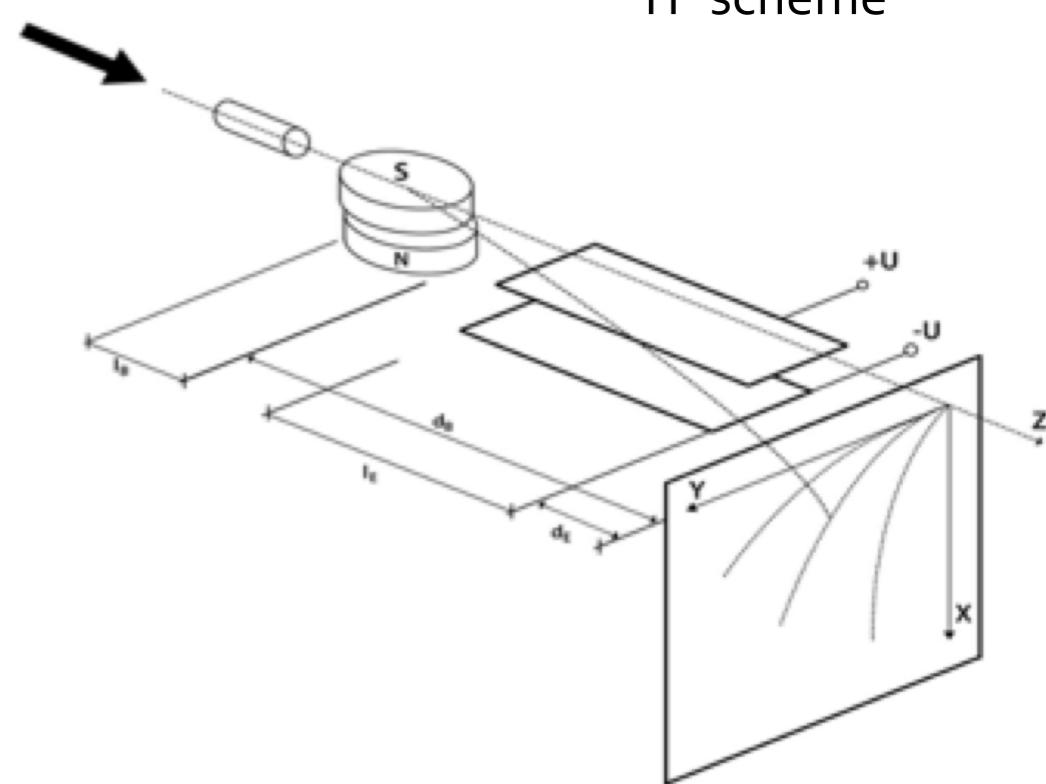
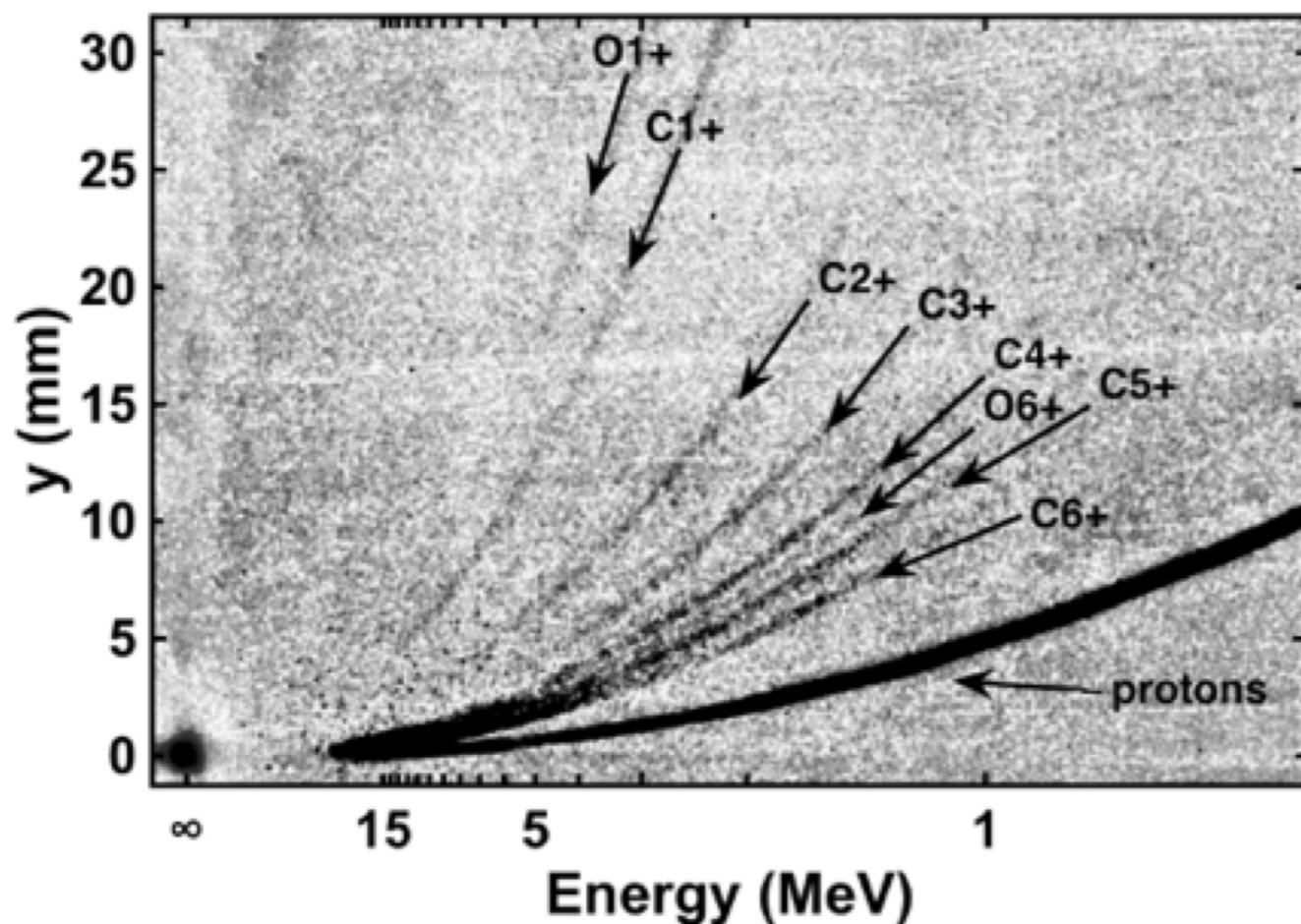
Pic. Focal spot

Direct parametric  
luminescence measurement  
gives  $2 \times 10^8$



TP scheme

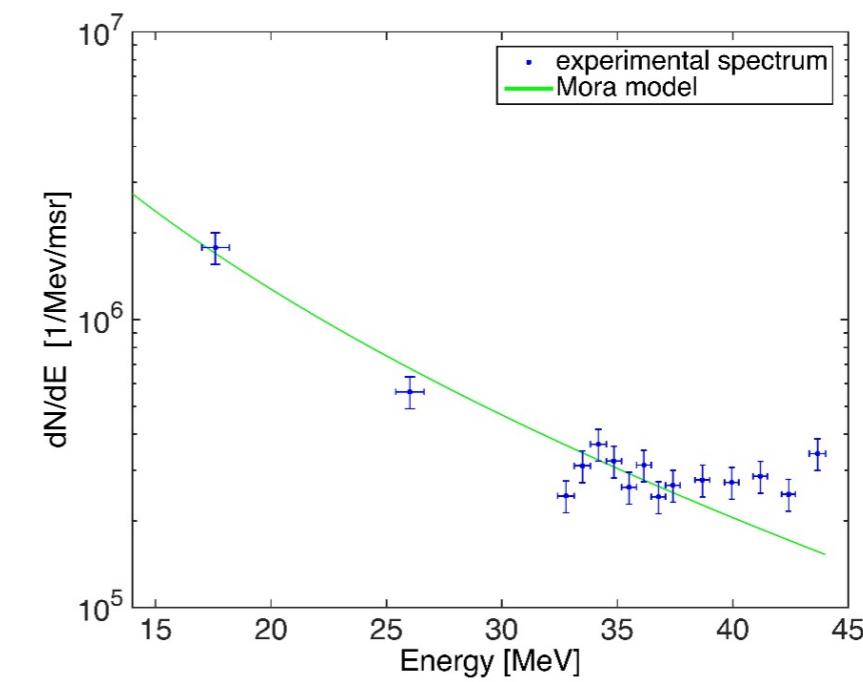
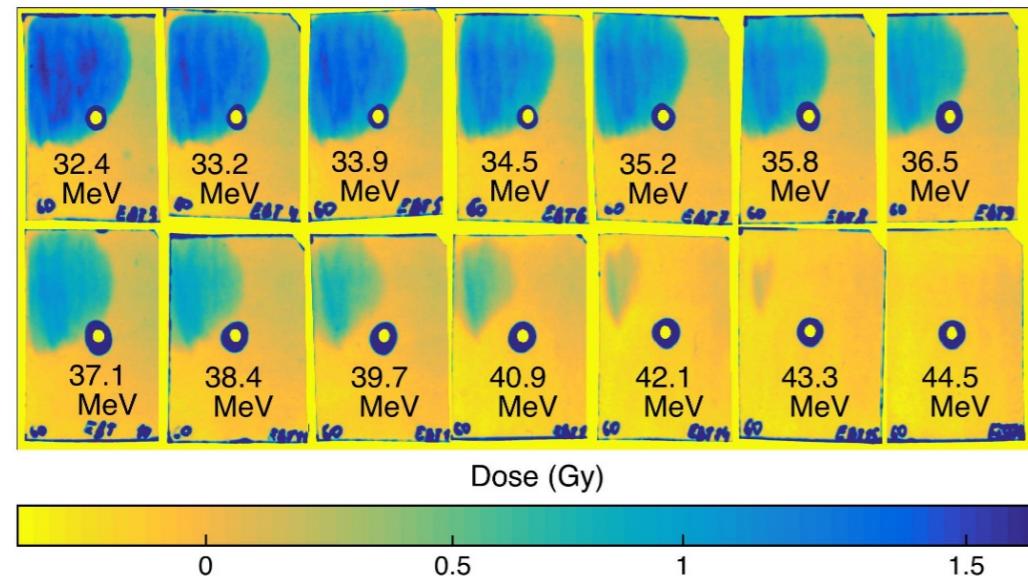
Thomson parabola data:



E-field modulation

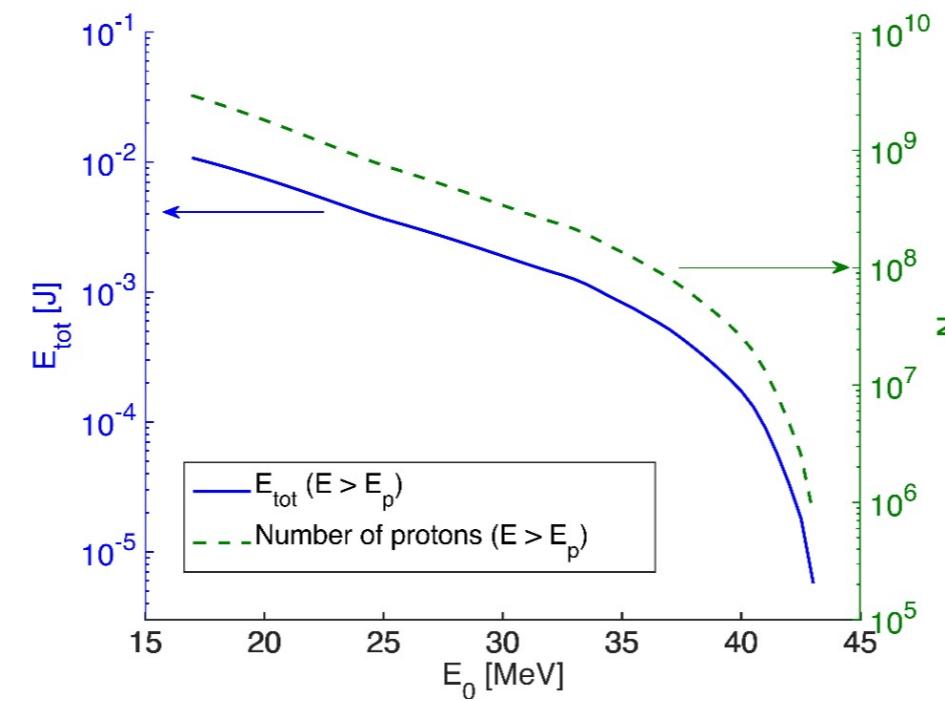
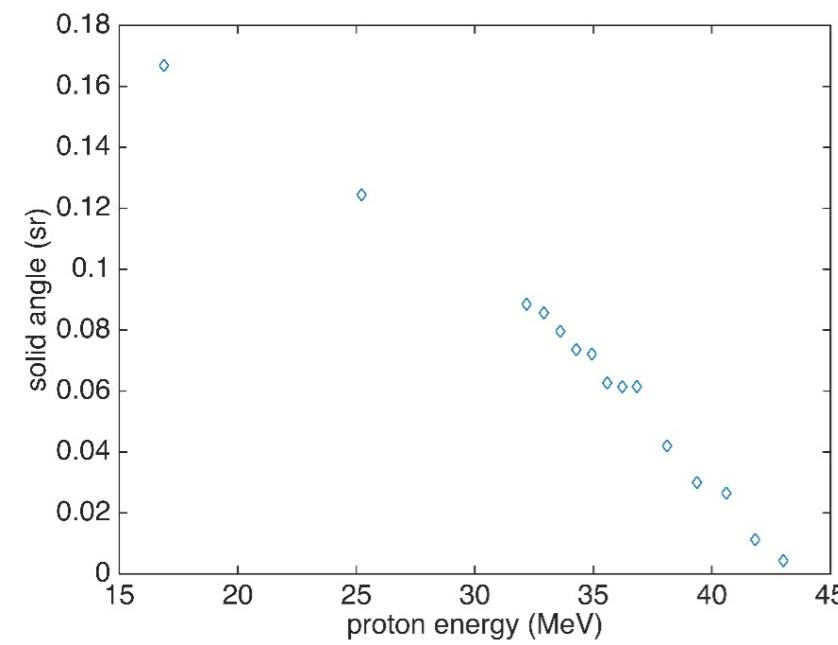
## Proton data: RCF

RCF1

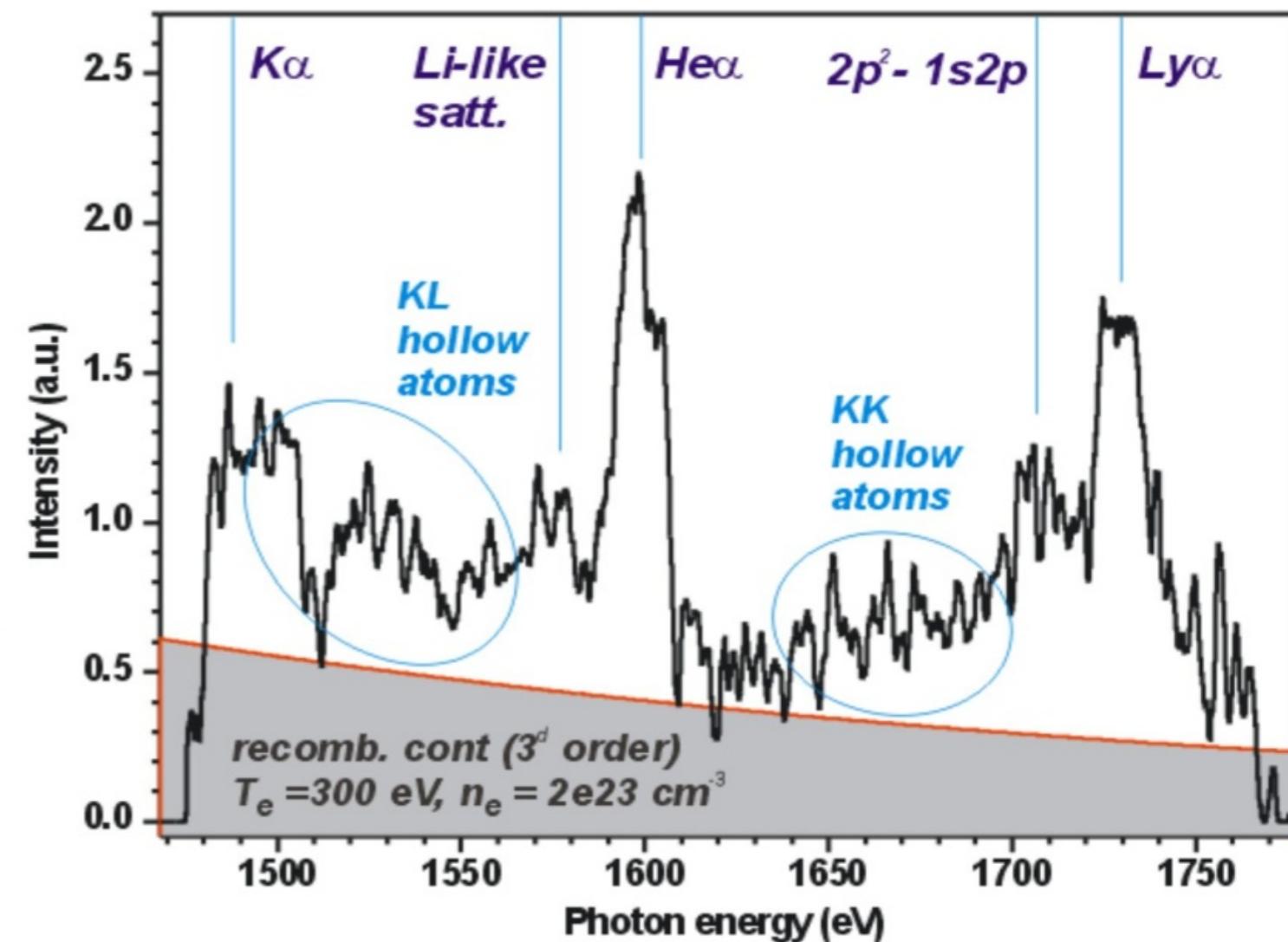
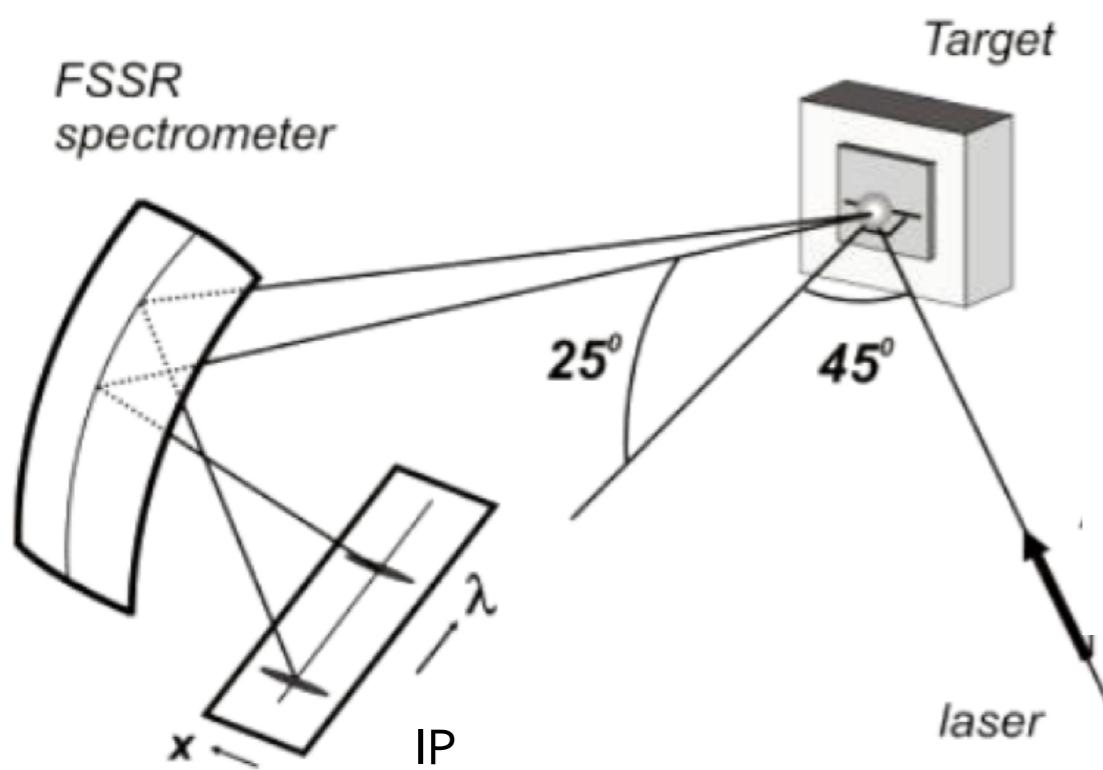


$$T_h = 3.1 \pm 0.3 \text{ MeV}$$

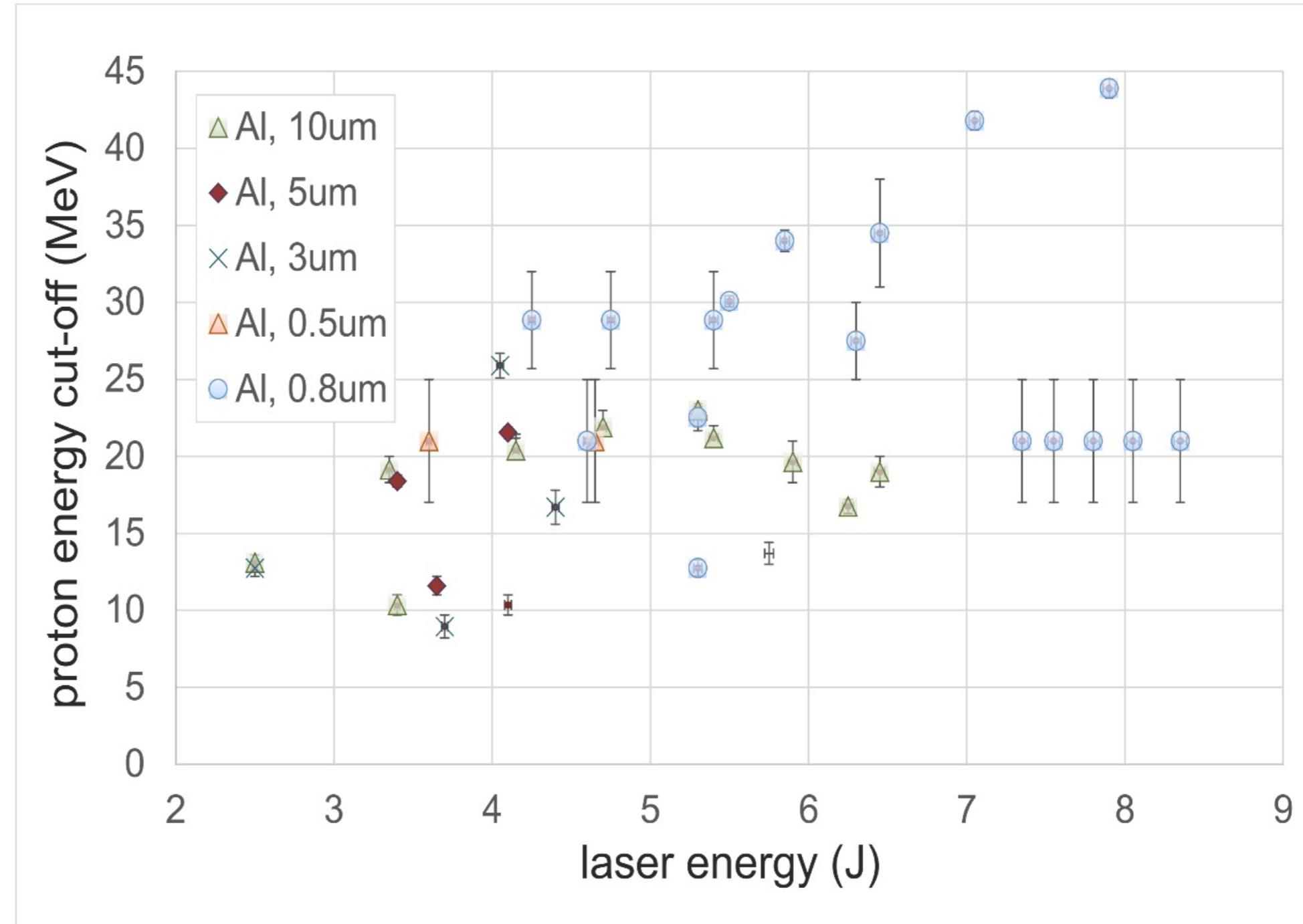
$$\text{P. Mora model: } \frac{dN}{dE} = \frac{n_{e0} c_s t_{acc} S_{sheath}}{(2ET_h)^{\frac{1}{2}}} \times \exp\left(-\sqrt{\frac{2E}{T_h}}\right)$$



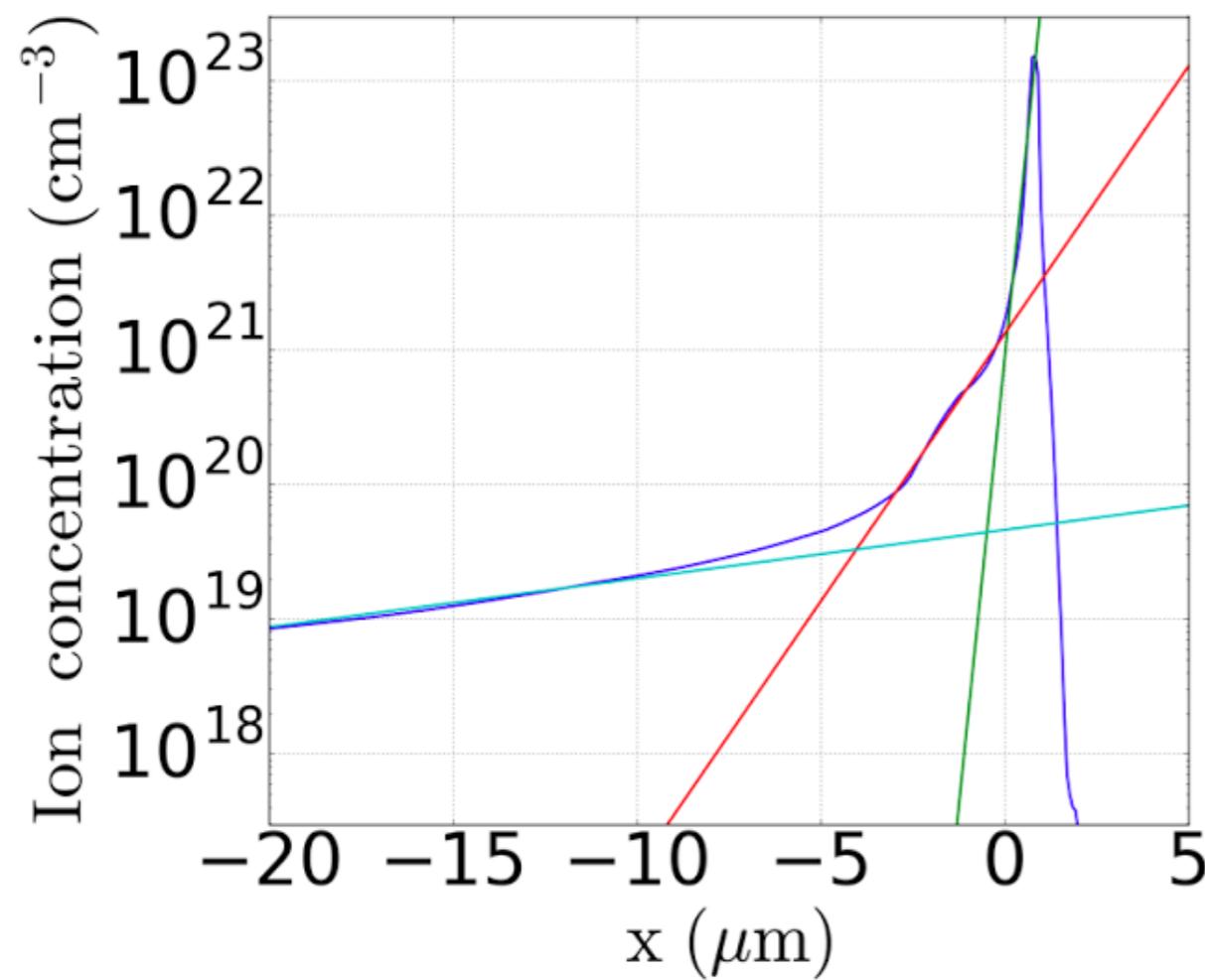
## X-ray diagnostics



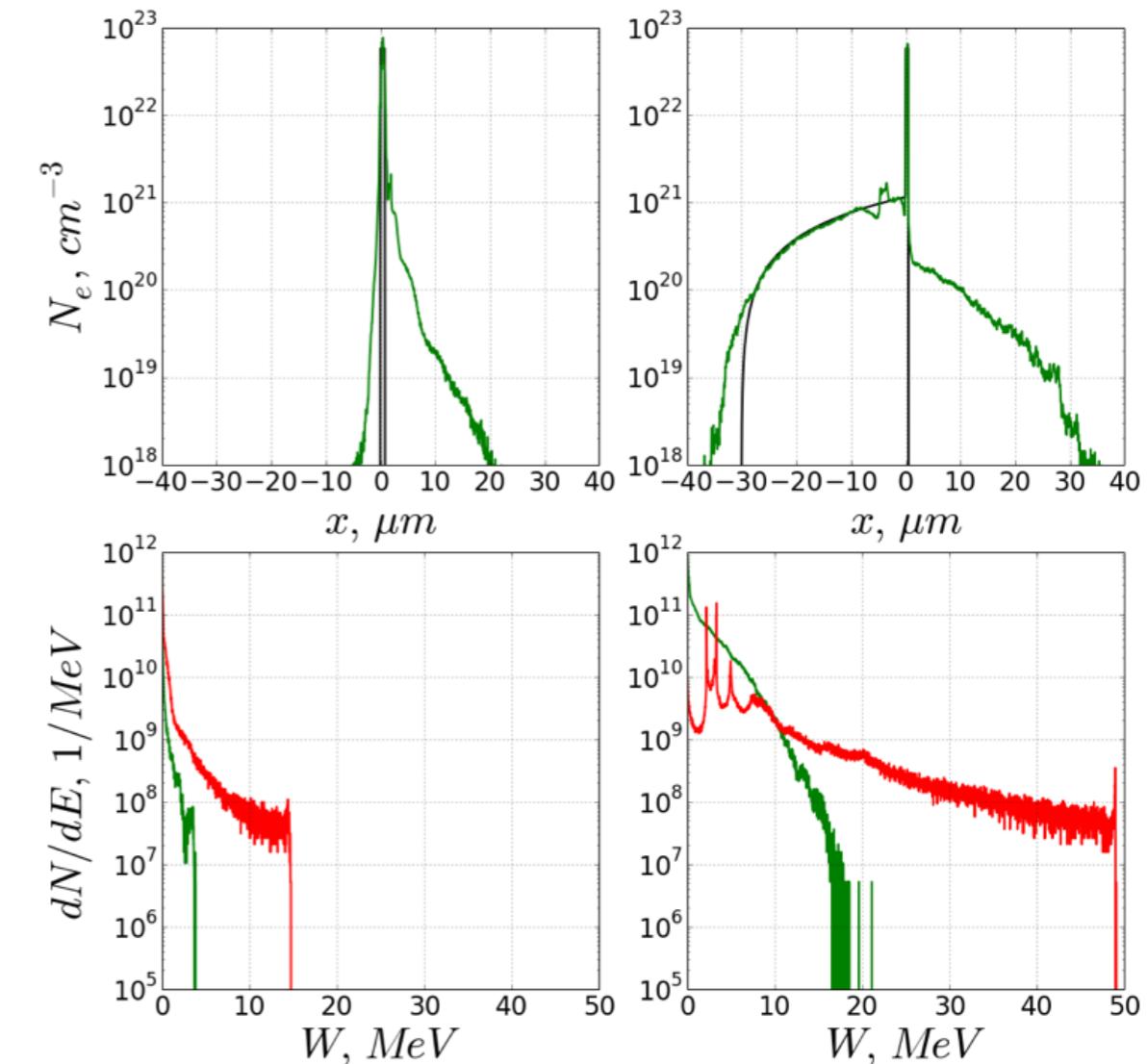
## Statistics of the shots



## Numerical simulations



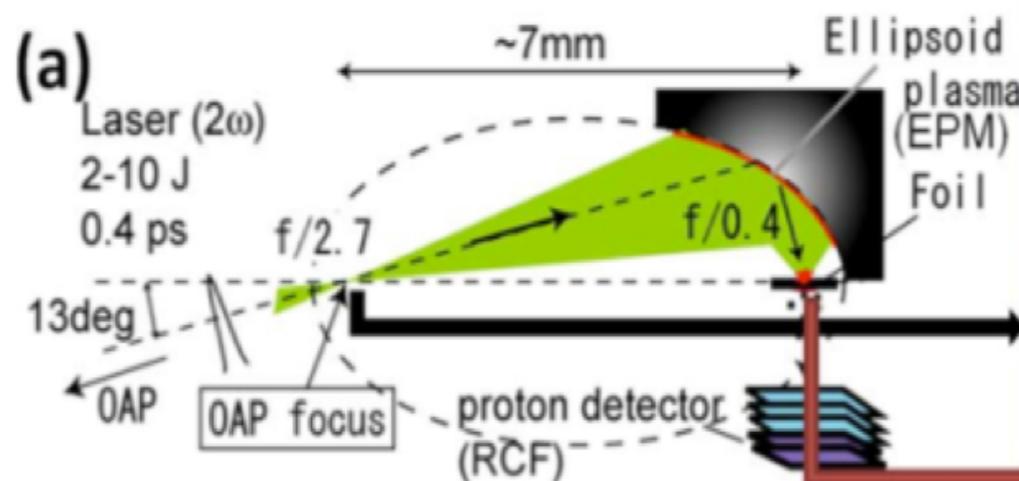
*Ion concentration of the target (blue line) at the moment of the main pulse arrival, fitted with green by  $\exp(x/L)$  with  $L = 0.16 \mu\text{m}$  for the overdense part; red by  $\exp(x/L)$  with  $L = 1.1 \mu\text{m}$  for the dense part; and cyan by  $\exp(x/L)$  with  $L = 12 \mu\text{m}$  for the low-dense part*



# РЕФОКУСИРОВКА ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЗЕРКАЛОМ

## ЕРМ

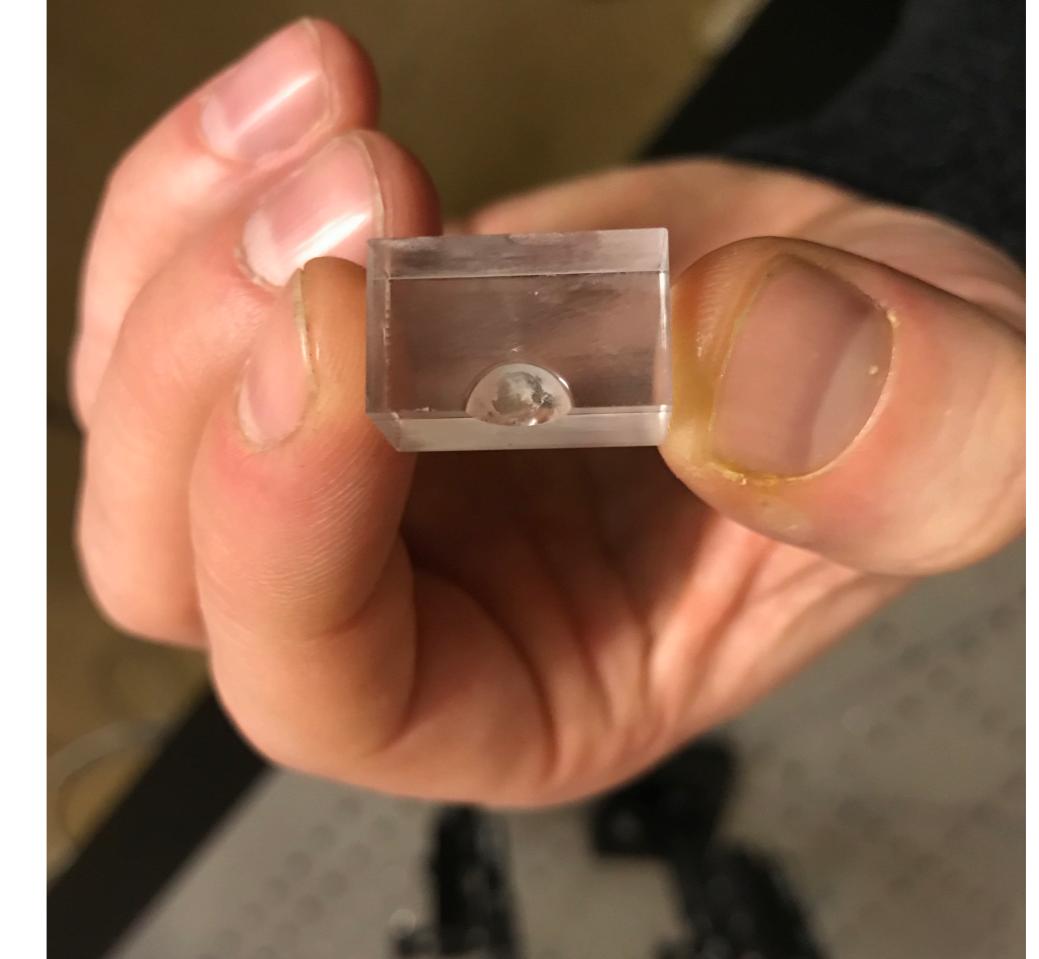
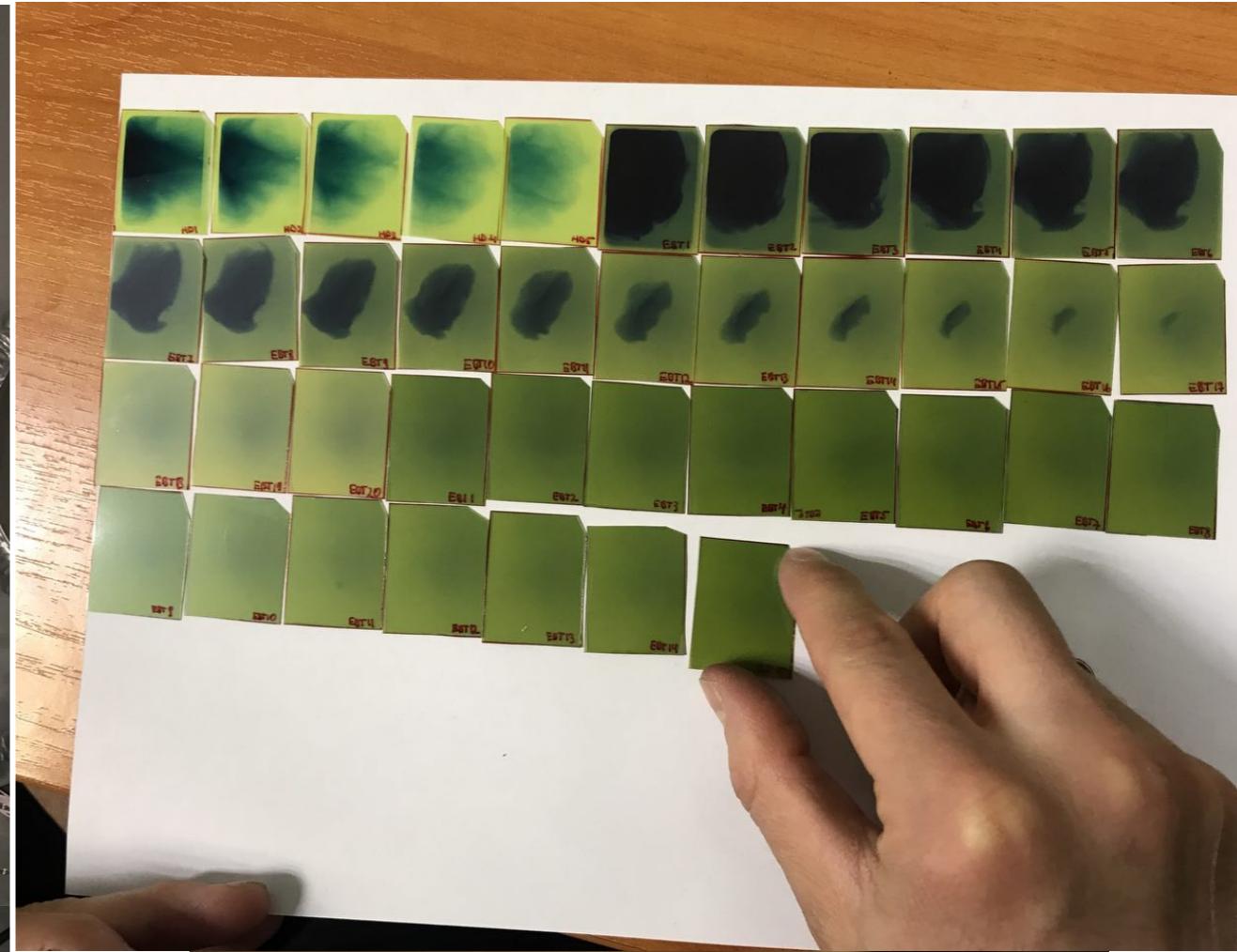
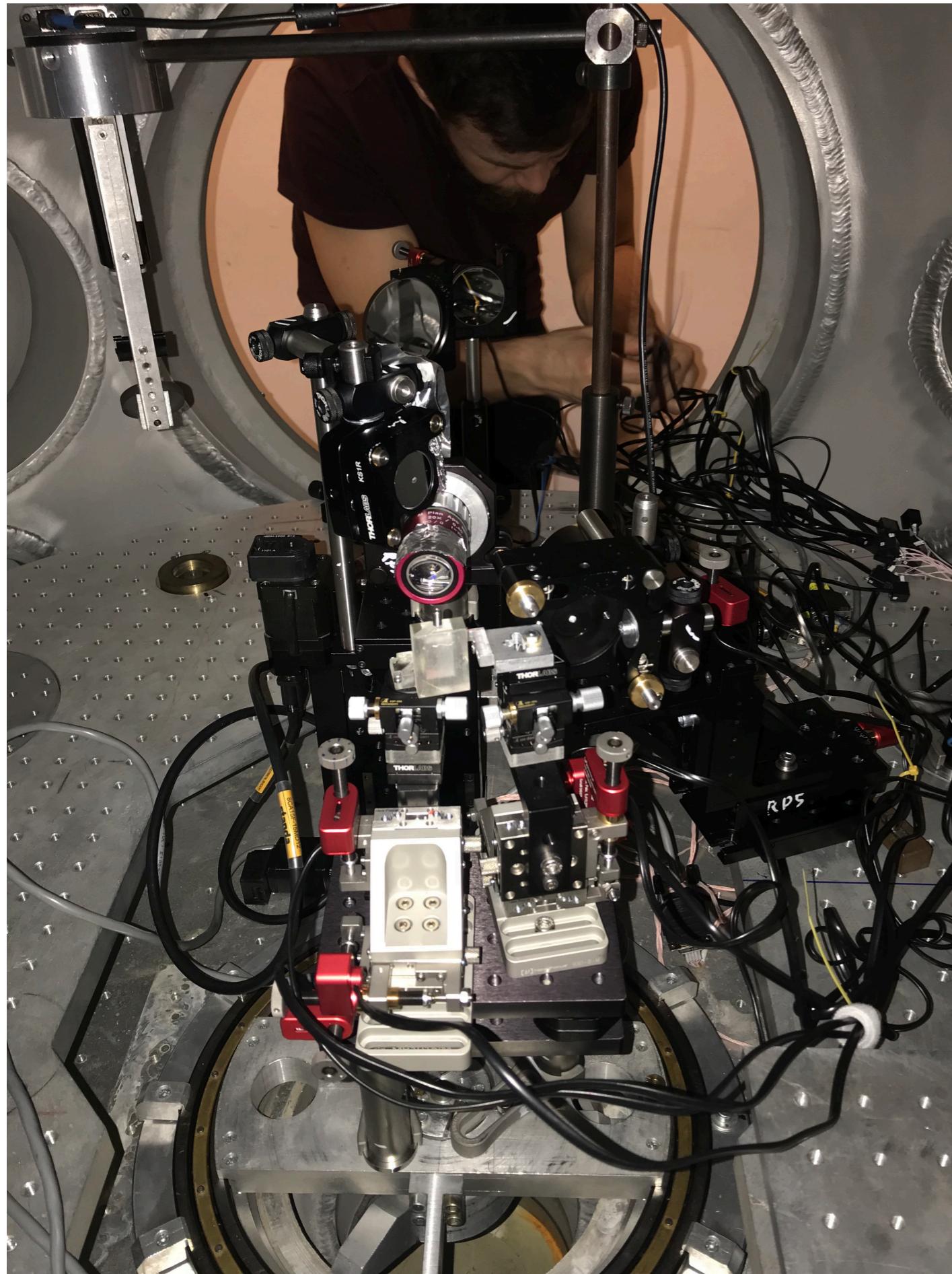
Tight focusing experiments:



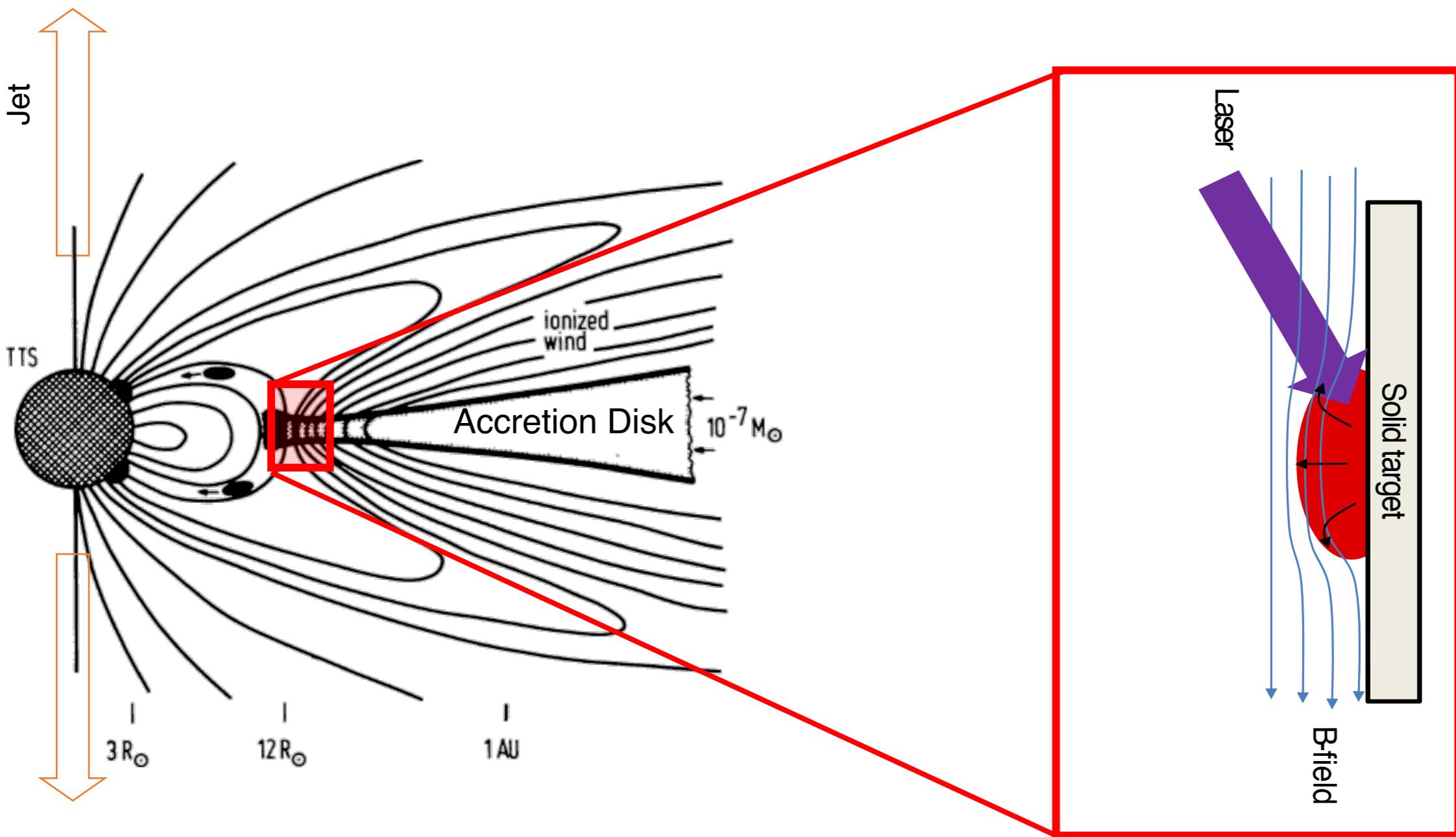
low-cost production efforts under way →



- Tight focusing for increased intensity has demonstrated higher TNSA energy
  - However, open questions remain on role of magnetic fields
  - Technology has not been tried for sub 100fs lasers.



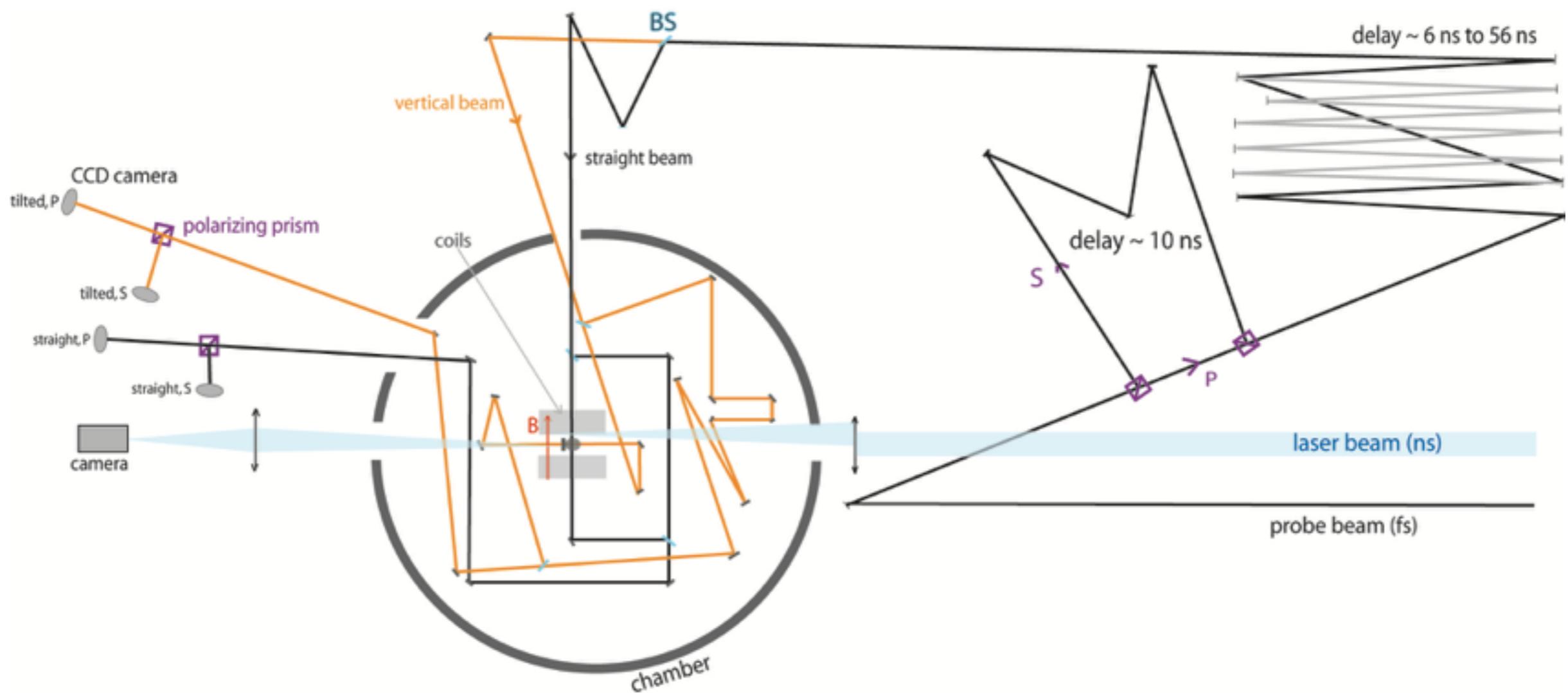
# ЛАБОРАТОРНАЯ АСТРОФИЗИКА



Reviews in Modern Astronomy, v. 3, (1990), p. 234-265.

Adapted from Bouvier, J., et al., arXiv preprint, (2006).

# ЛАБОРАТОРНАЯ АСТРОФИЗИКА

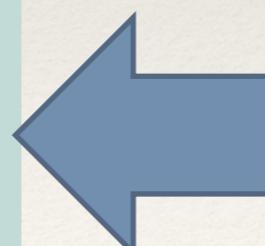


# Laser / astrophysical plasma scaling

Quantity	Laser-plasma	YSO
$B_0$	$10^{13} \text{ W/cm}^2$	$\sim 1\text{e}-3 \text{ G}$
Peclet	20 T	$1.0\text{e}11$
Reynolds	$1.0\text{e}4-1.0\text{e}5$	$1.0\text{e}13$
Magnetic Reynolds	50-5000	$1.0\text{e}15$
Mach ( $v_{\text{jet}}/c_s$ )	1-50	10-50
$\beta = p_{\text{plasma}}/p_{\text{magnetic}}$	>>1 near source <<1 away	Same, <<1 from ~10s AU

$P_e > 1$ : close to 1, thermal conduction plays a minor role  
 $R_e \gg 1$ : viscosity negligible  
 $R_{\text{em}} > 1$ : magnetic field lines frozen in the outflow  
 $M > 1$ : outflow supersonic  
 $\beta$ : plasma varies from kinetic to magnetically dominated

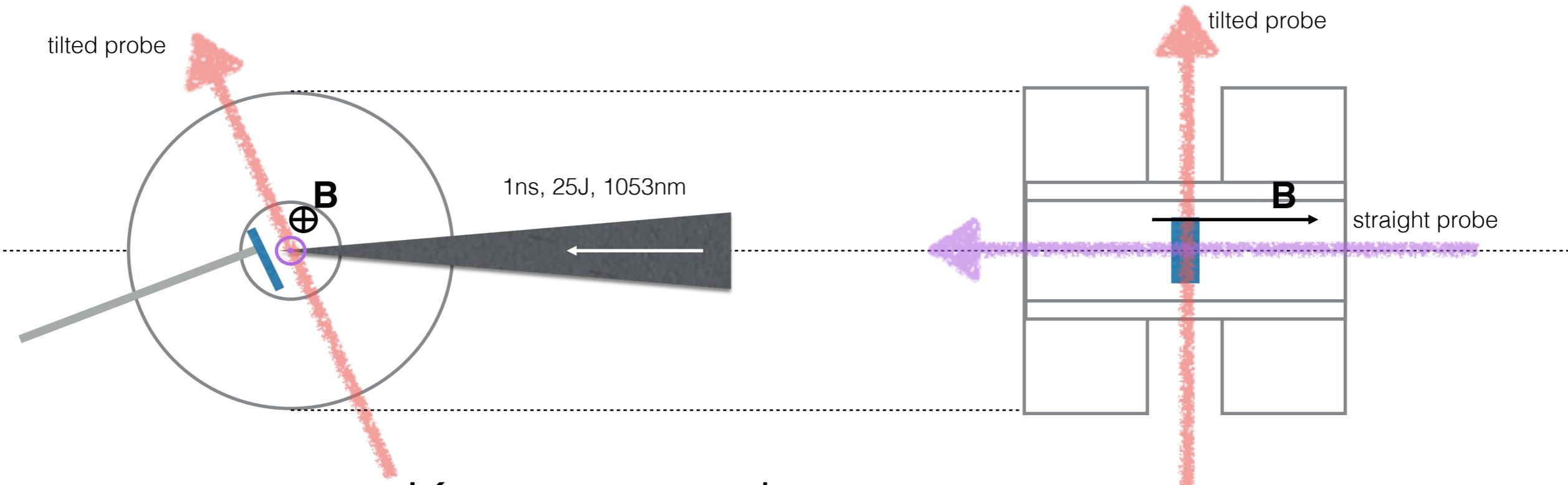
- ❖ Time: 20 ns → 6 years
- ❖ Space: 1 mm → 300 AU, or  $4.5 \cdot 10^{13} \text{ m}$
- ❖ Magnetic field: 20 T →  $1 \mu\text{T}$



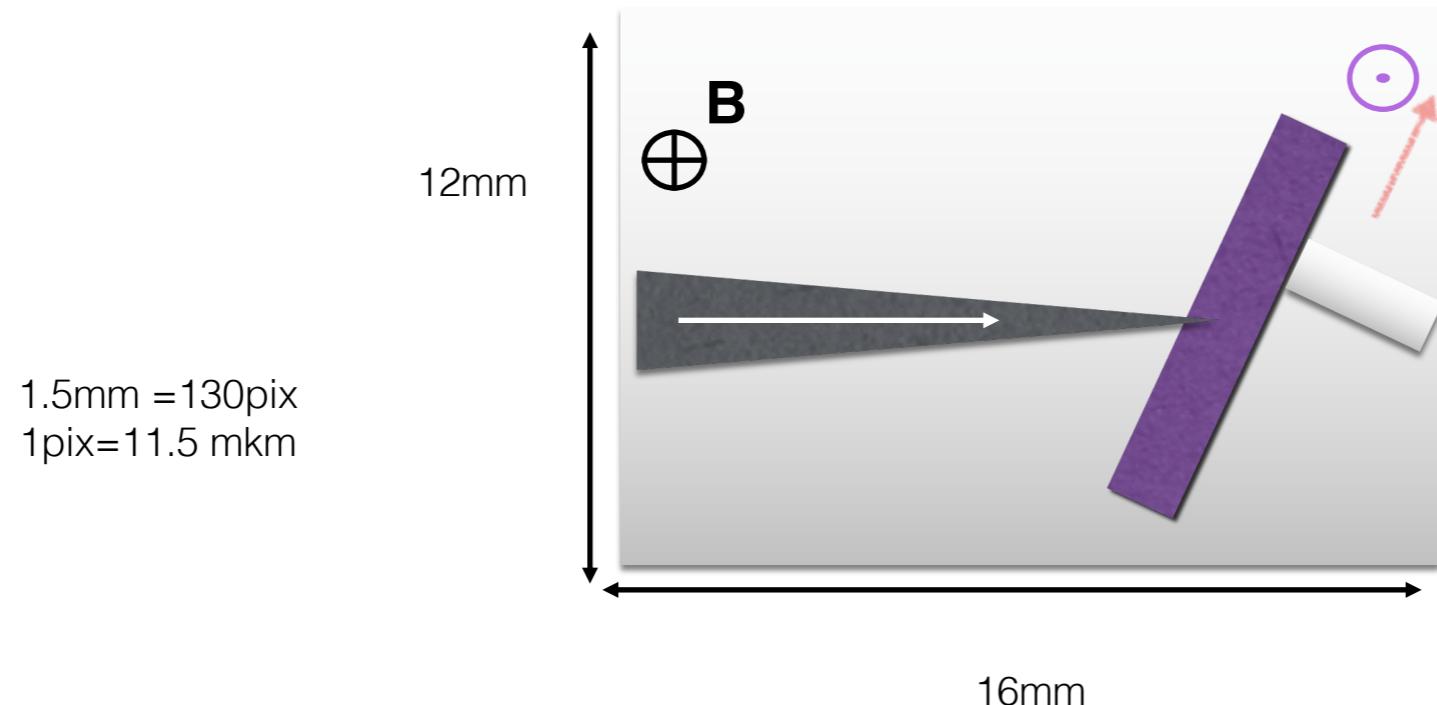
Both are ideal MHD plasmas

Вертикальное сечение в плоскости  
наносекундного импульса

Вертикальное сечение  
в плоскости магнитно поля



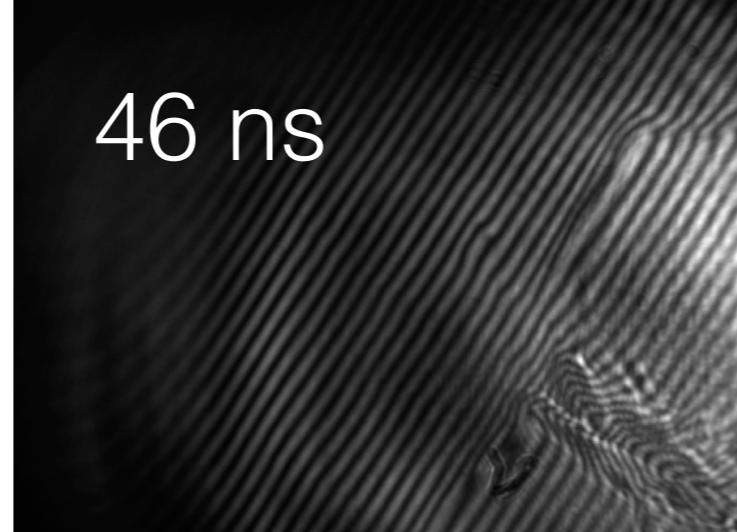
Карта интерферограммы:



16 ns



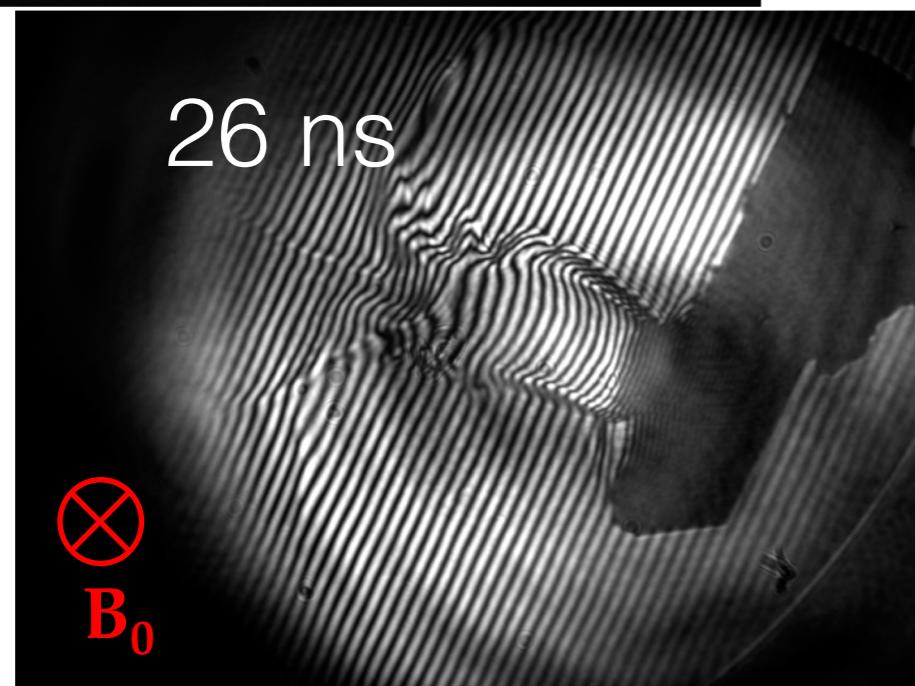
46 ns



$\sim 20\text{Дж}@1w, 600\text{мкм}$

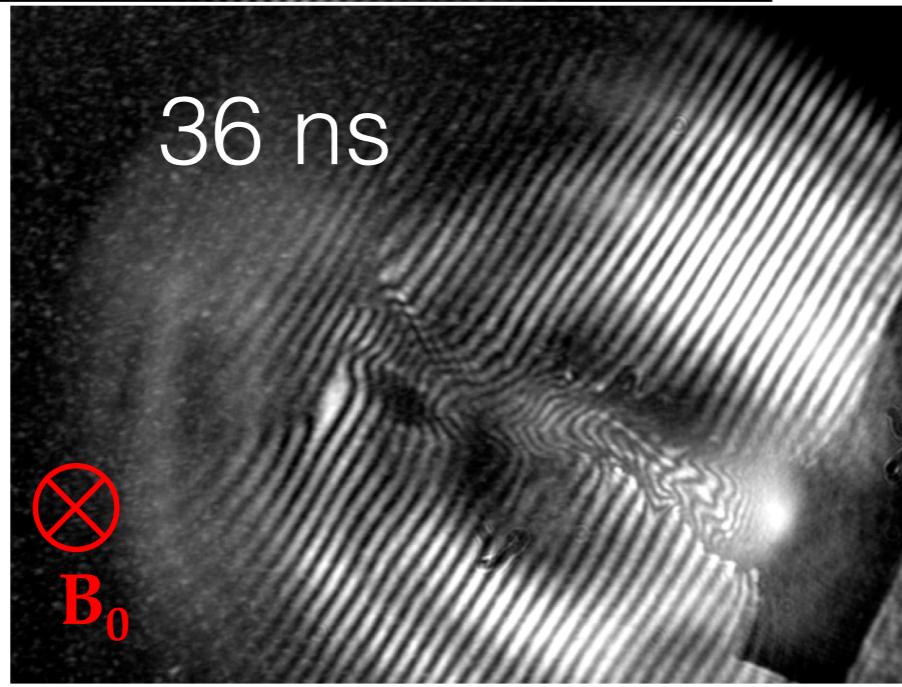


26 ns



Изображение, полученное комбинацией интерферограмм из двух разных выстрелов, отличающихся положением мишени в апертуре зондирующего фемтосекундного импульса.

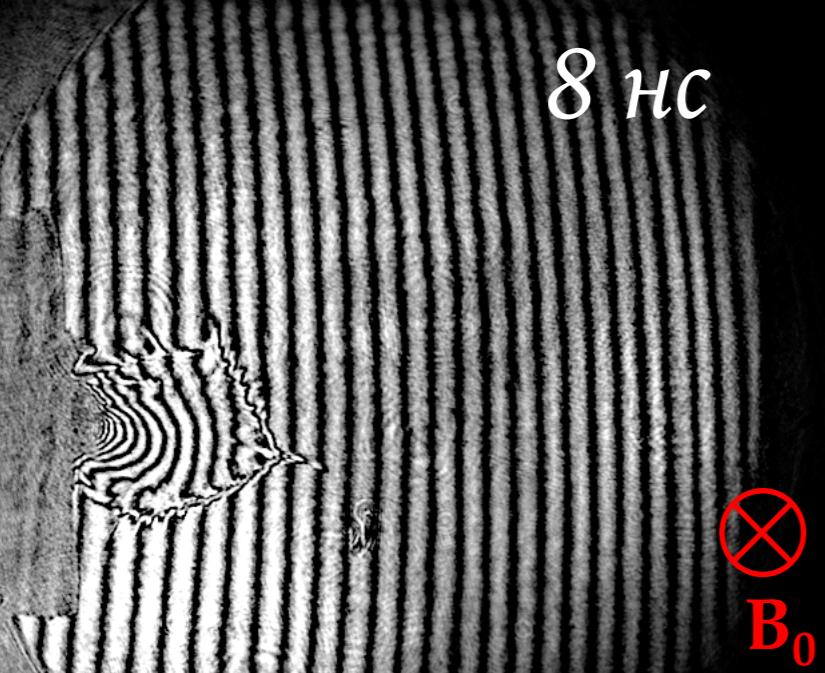
36 ns



16 ns,  
 $B=0$



8 нс



38 нс

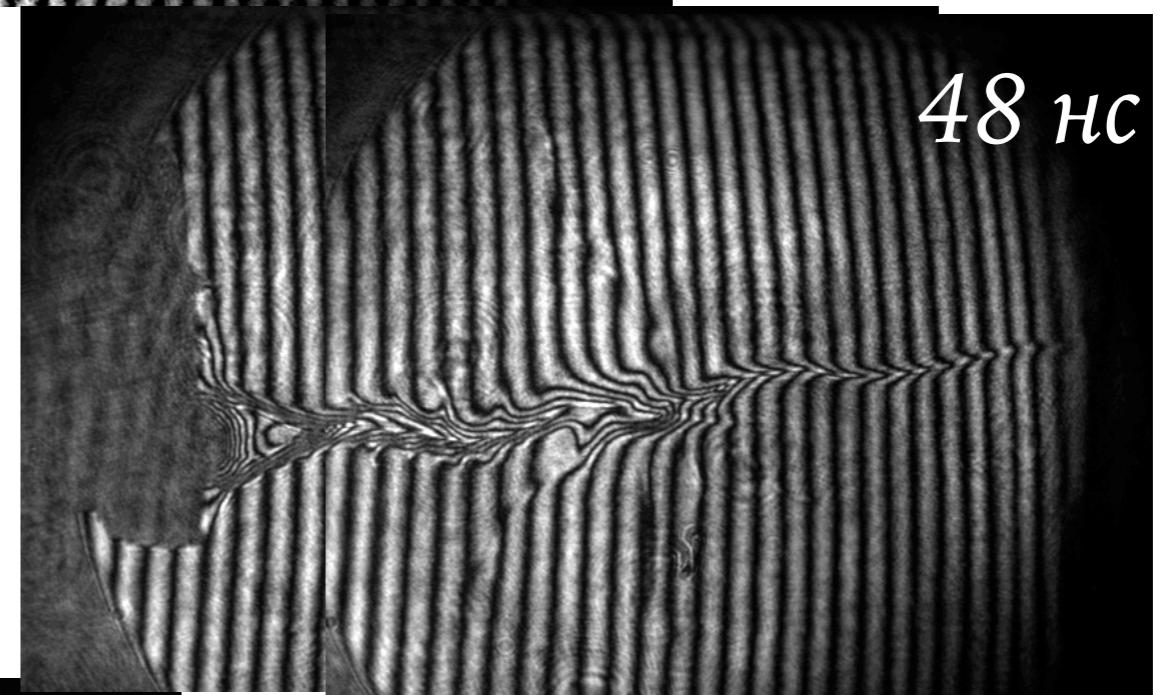


$\sim 20\text{Дж}@1w, 600\text{мкм}$

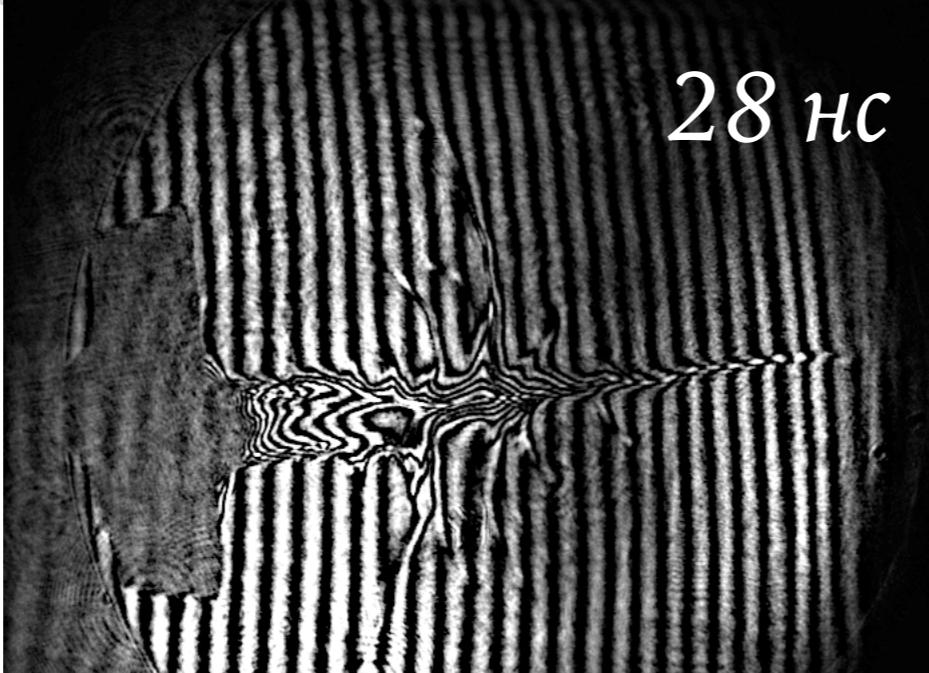
18 нс



48 нс



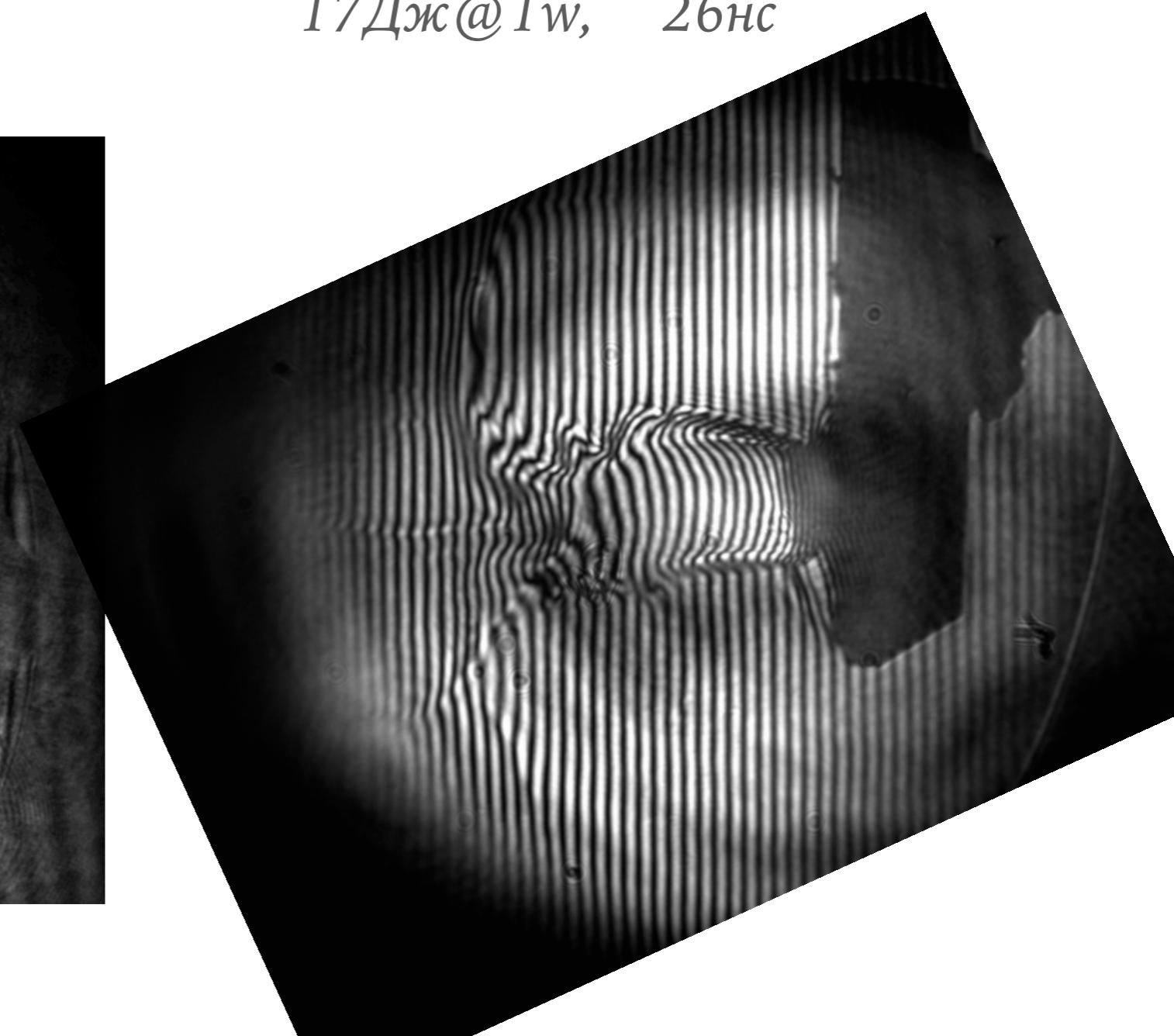
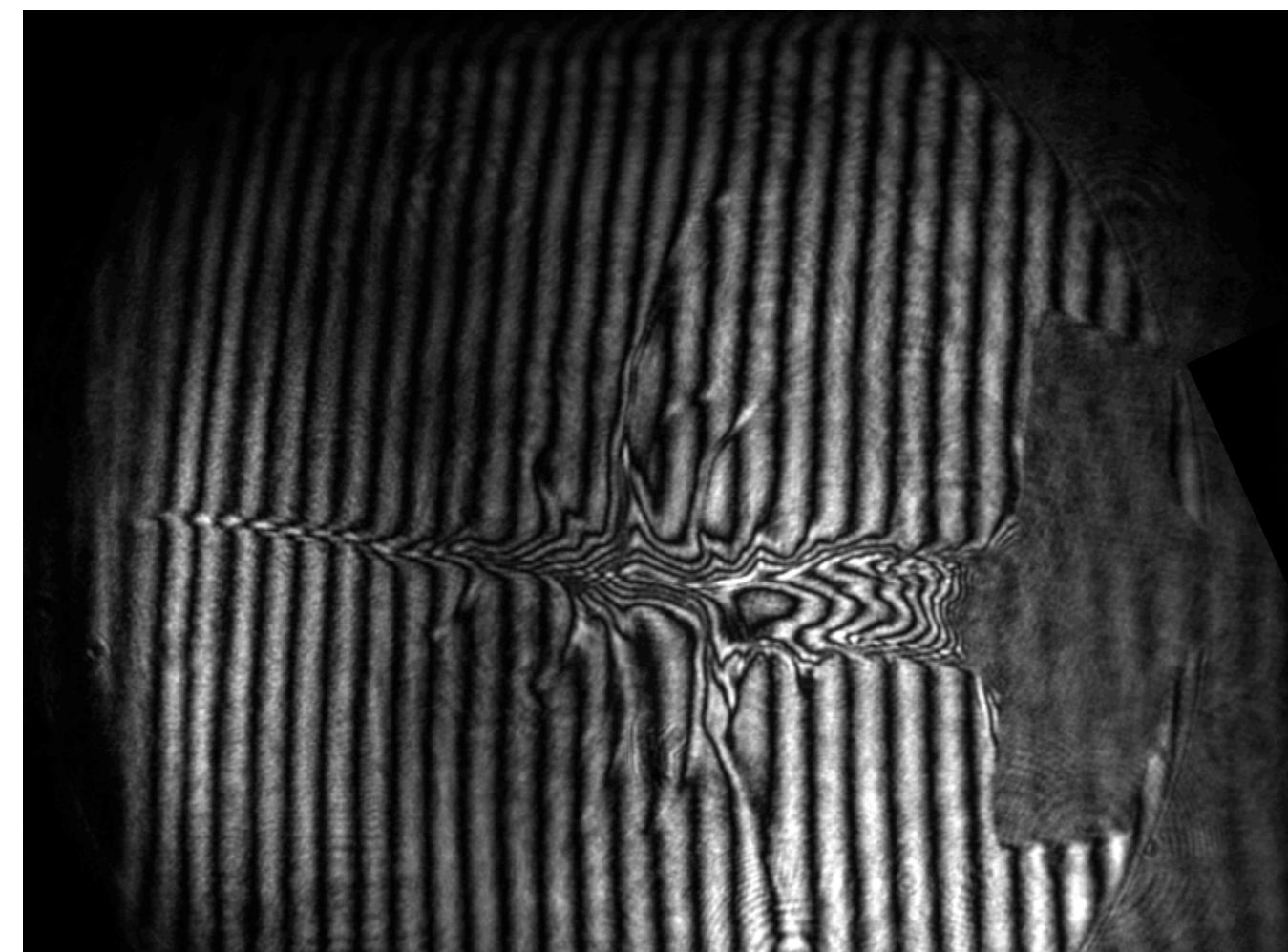
28 нс



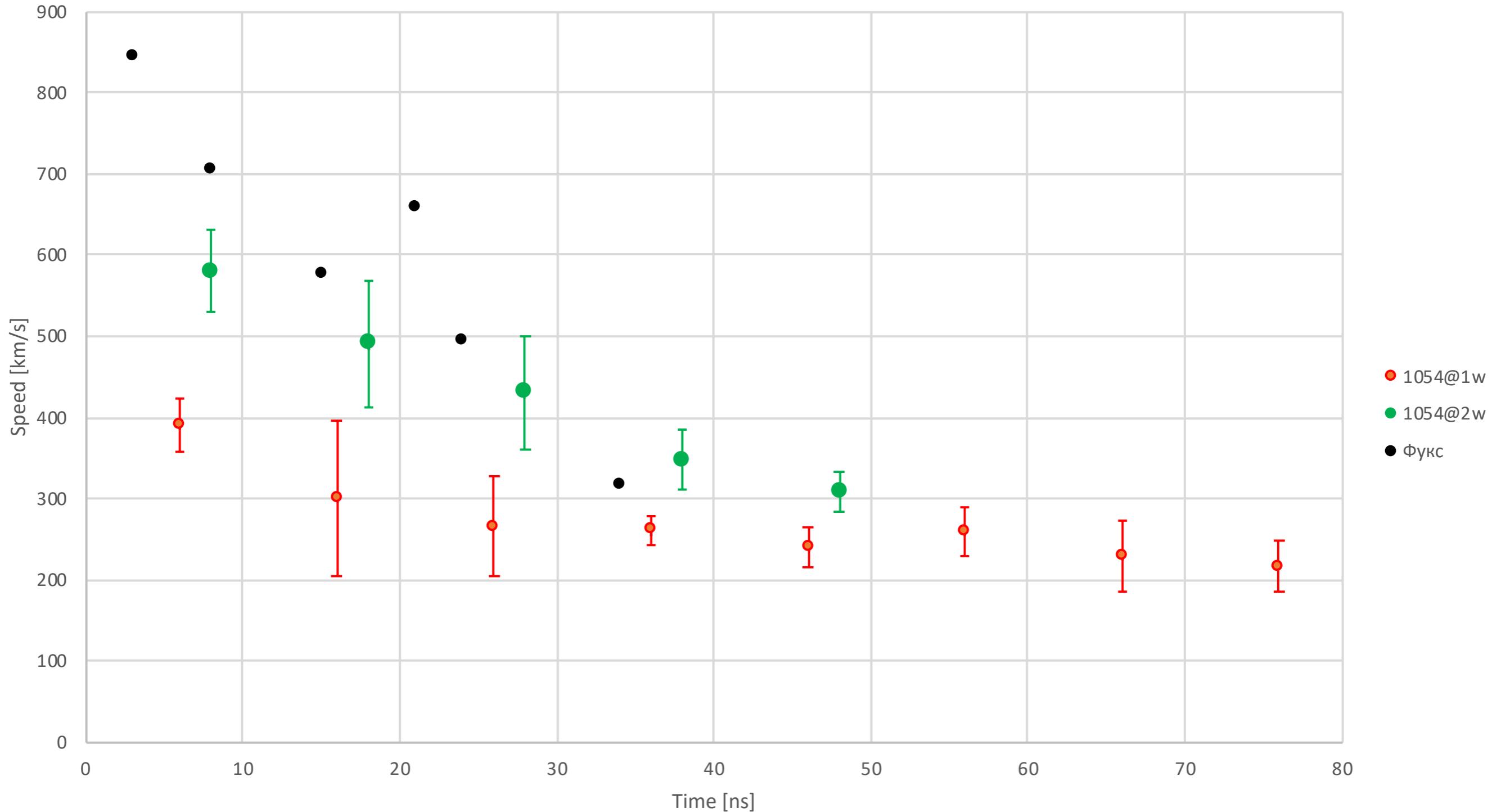
*Сравнение выстрелов на @1w и @2w*

17Дж@2w, 26нс

17Дж@1w, 26нс

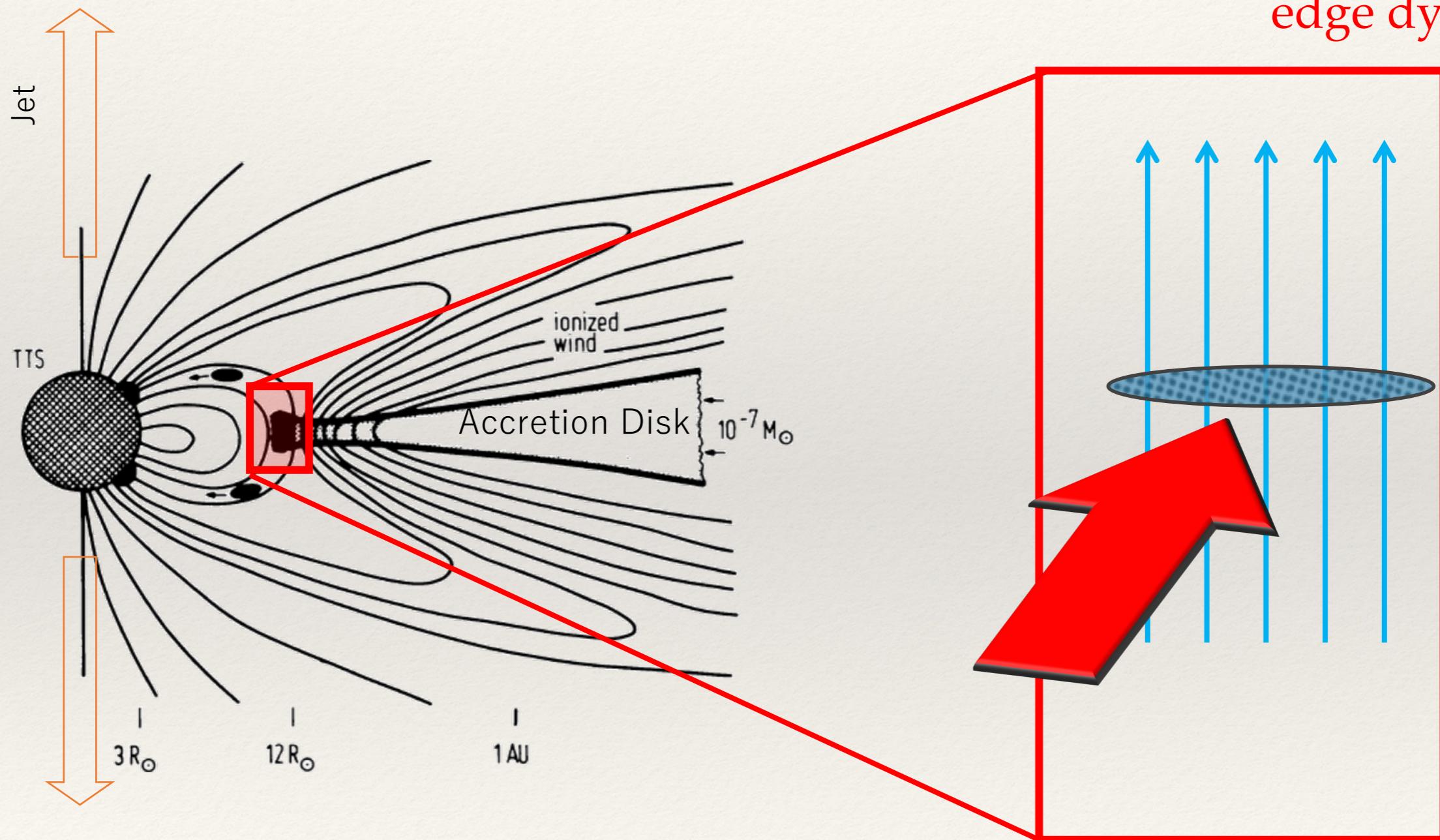


### Mean speed [1 ns, 1054@ $x\omega$ , 13.5 T]



# Laboratory astrophysics

- ❖ Modeling of magneto-hydrodynamic plasma phenomena: **accretion disc edge dynamics**



Adapted from Camenzind, (1990).

s091

28 ns

22.6 J

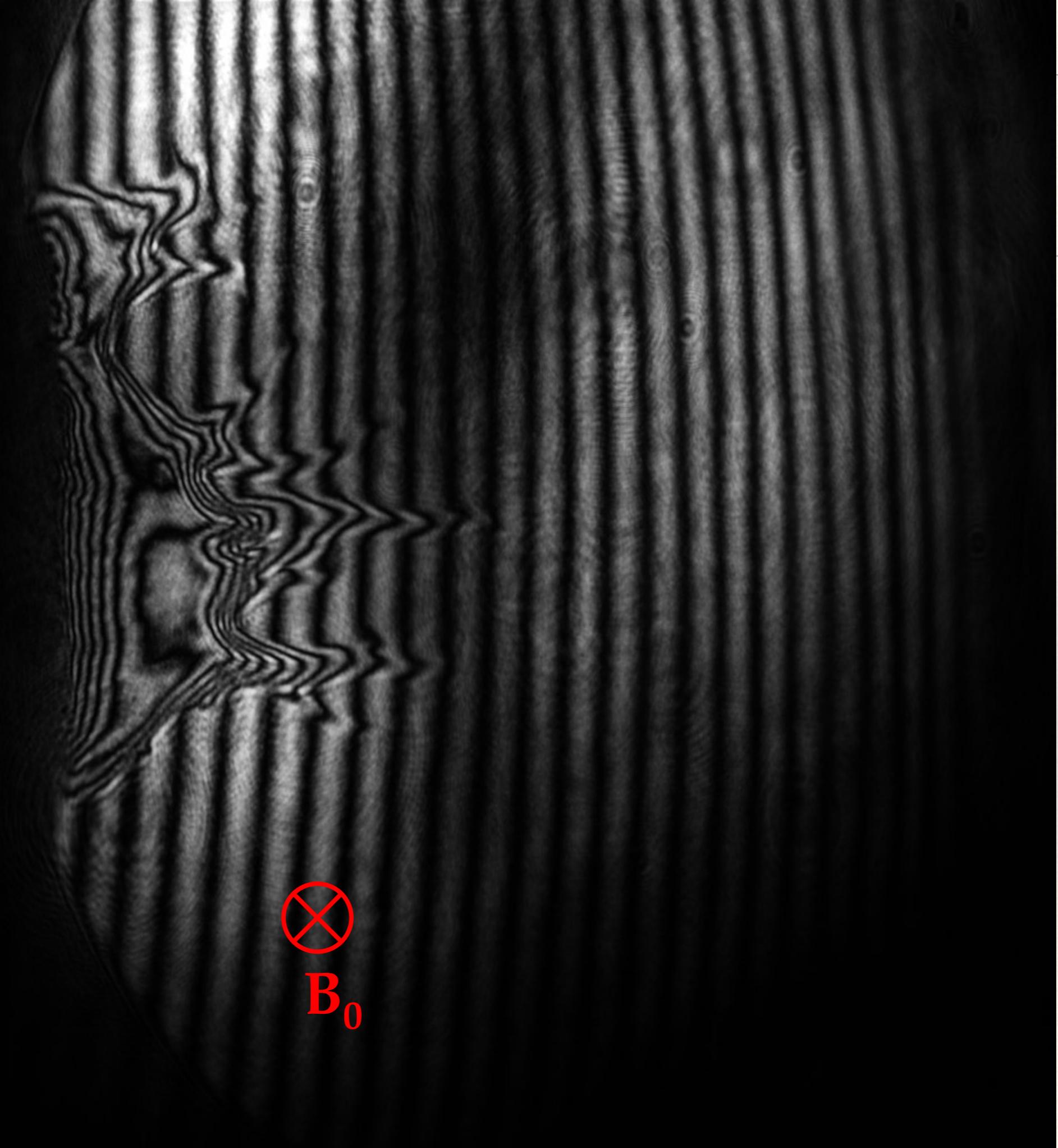


$B_0$

s094

48 ns

26.4 J



$B_0$

s098

68 ns

27.8 J



s100

88 ns

26.9 J



$B_0$

s102

108 ns

26.2 J

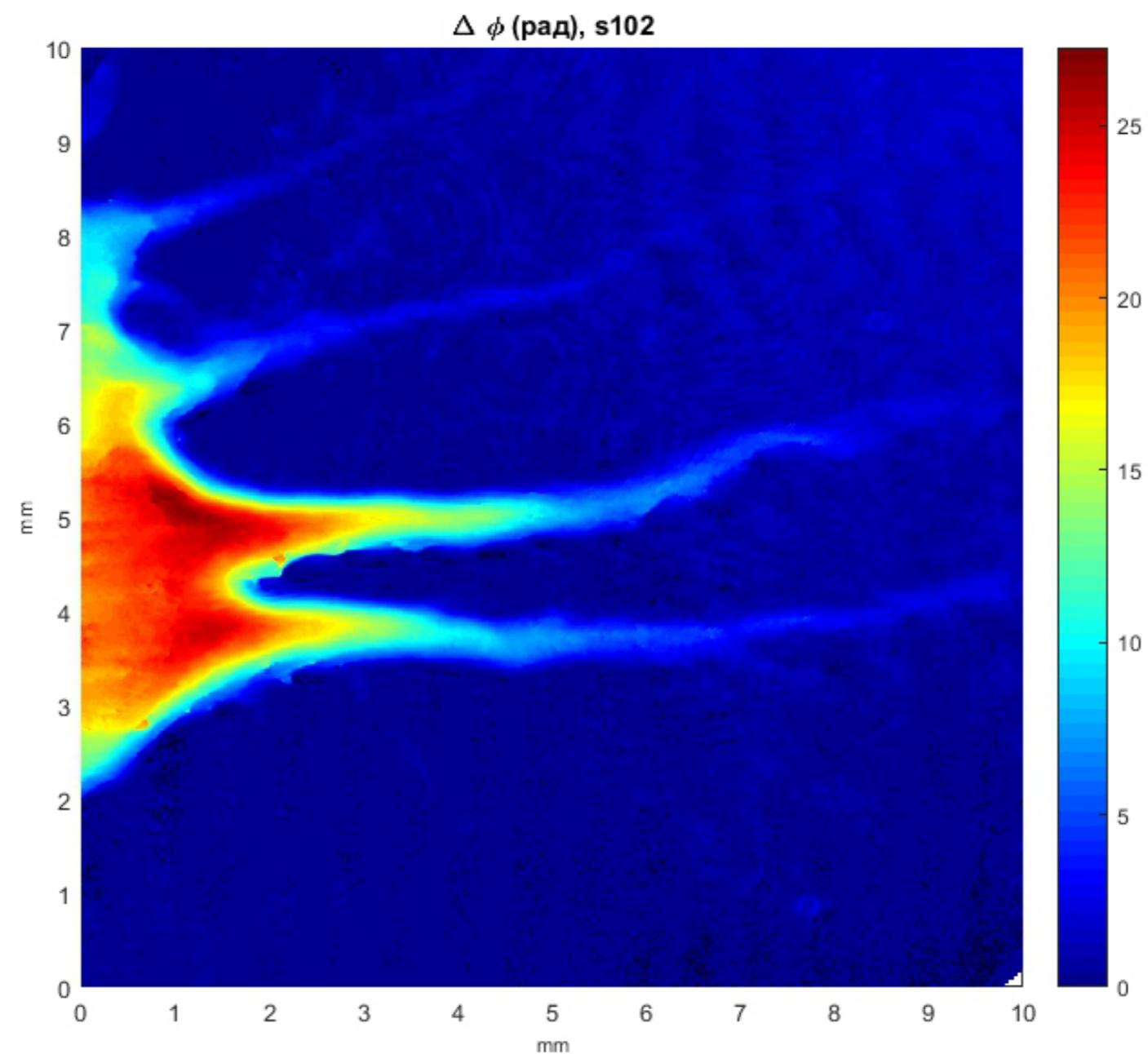


$B_0$

s102

108 ns

26.2 J

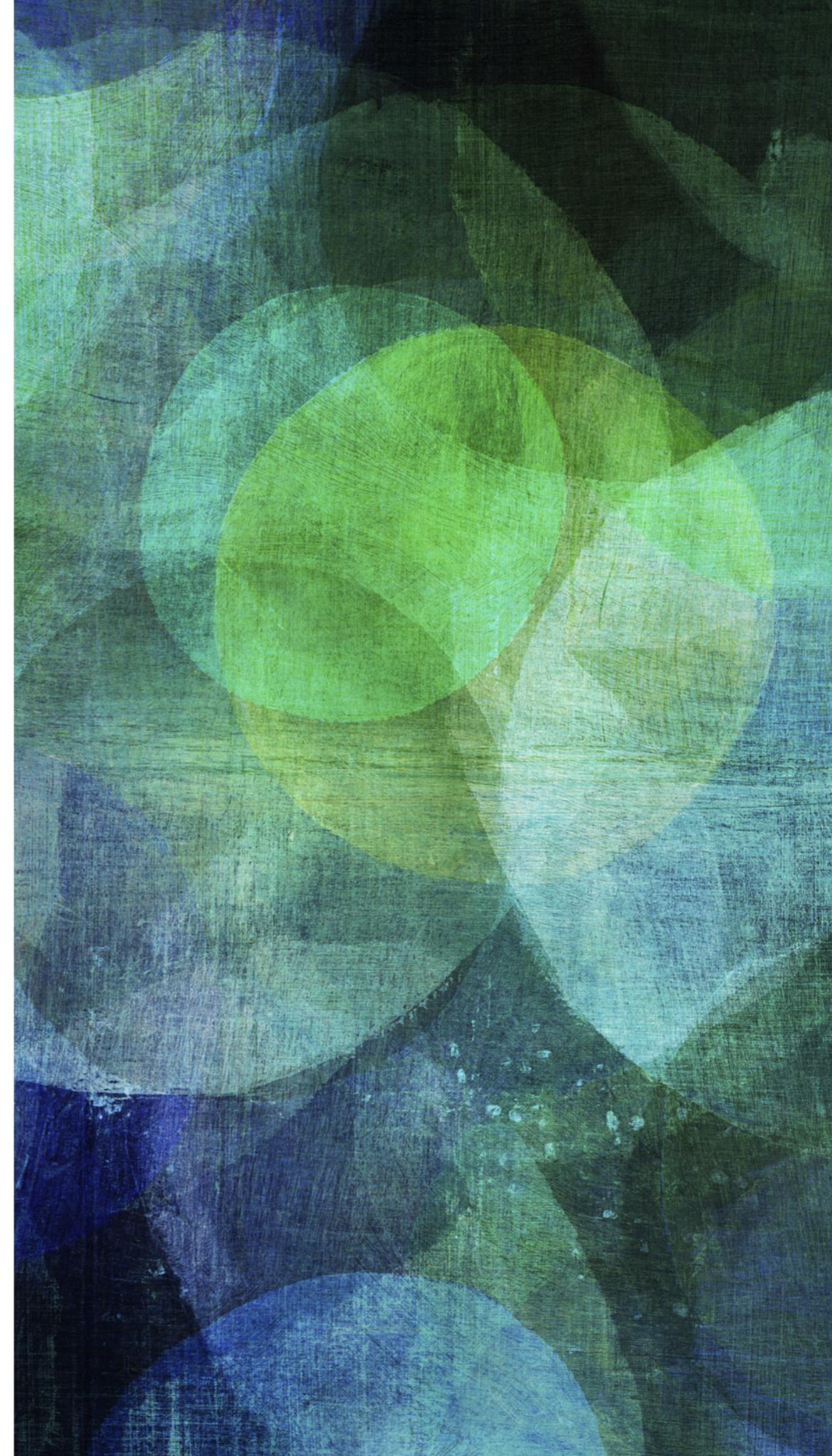


$B_0$

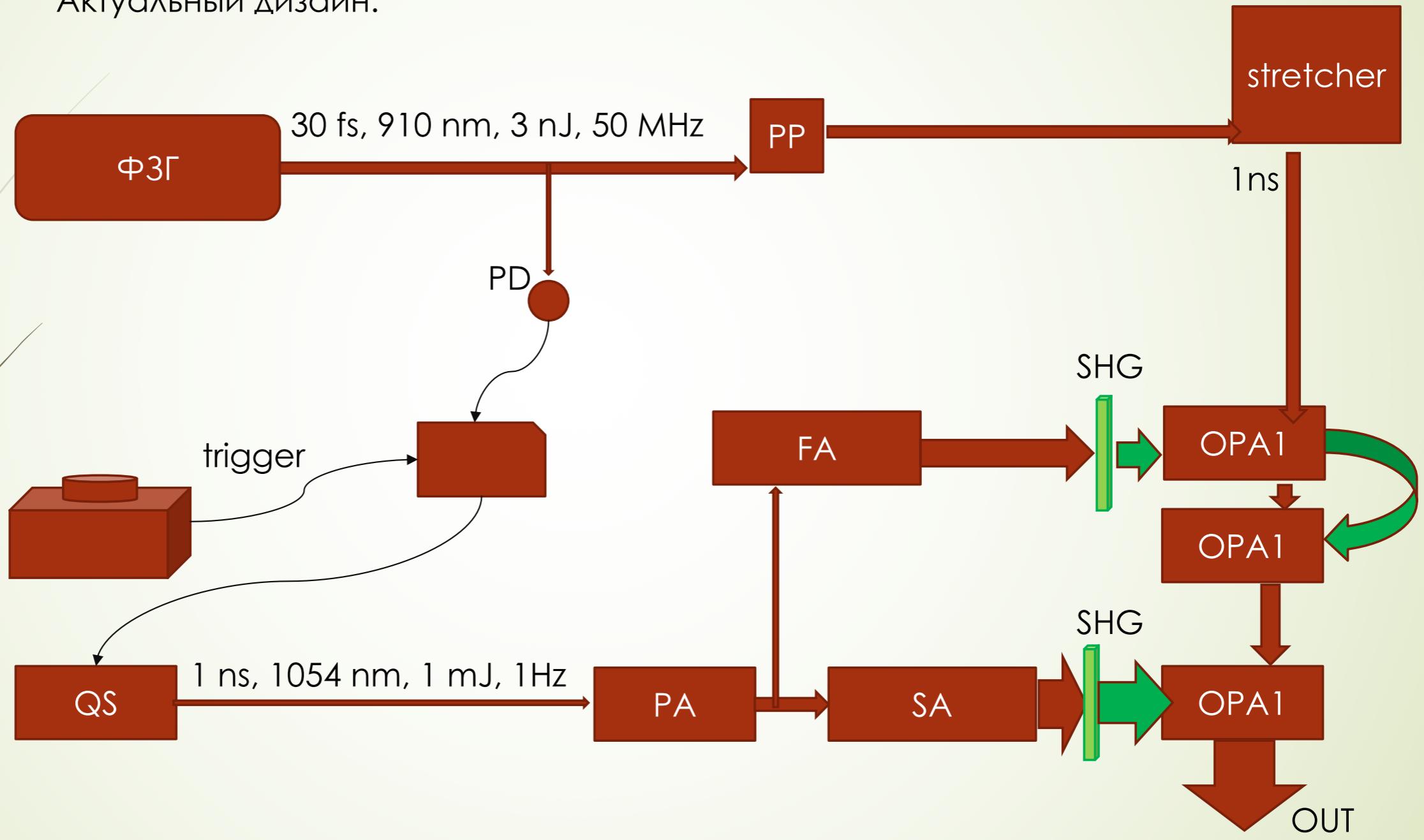
# ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ

---

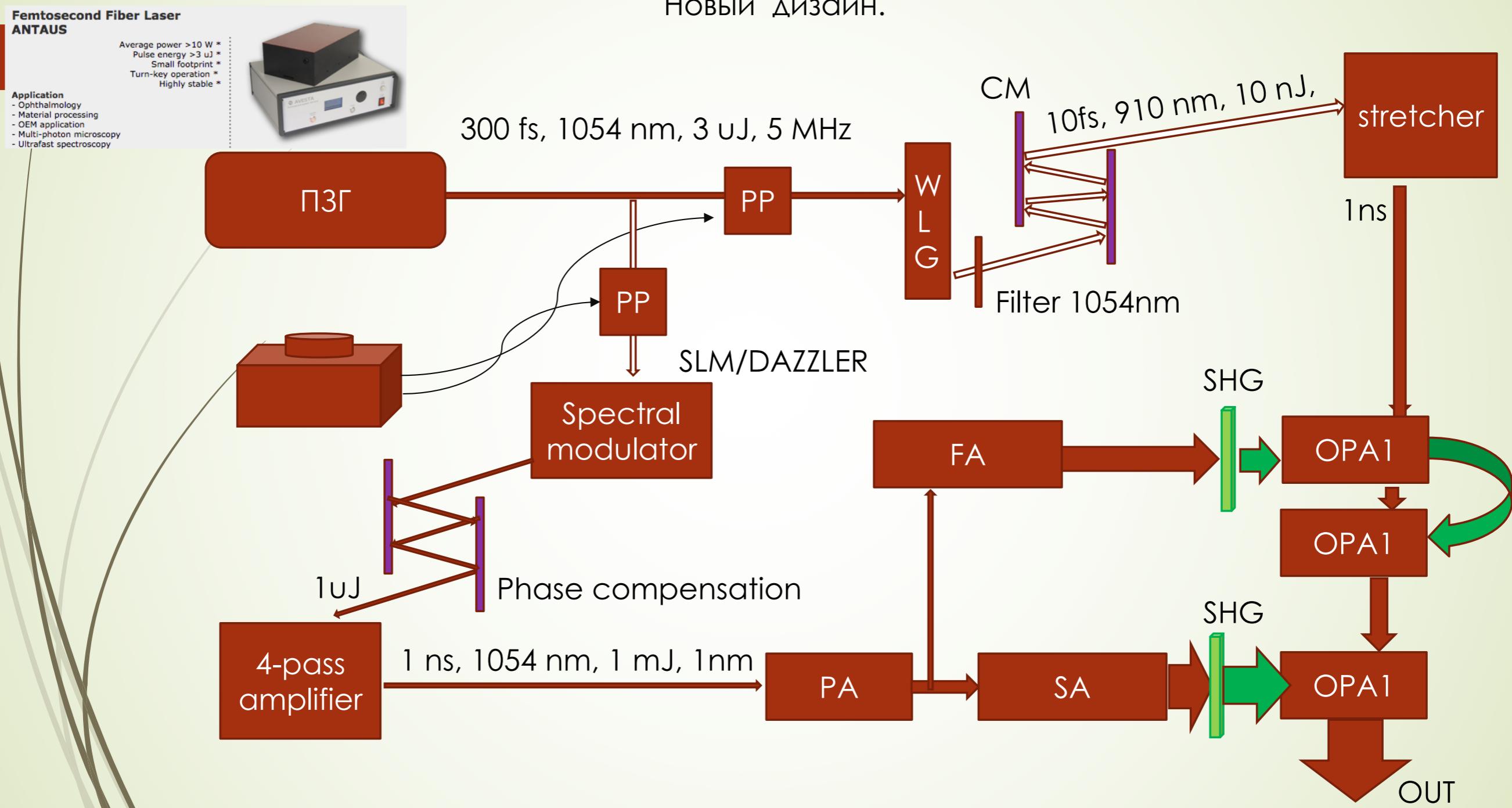
*Правильный вектор  
развития*



Стартовая часть PEARL.  
Актуальный дизайн.



## Стартовая часть PEARL. Новый дизайн.



Спасибо за внимание!