

М.В. Стародубцев, Р.С. Земсков, А.В. Котов, С.Е. Перевалов, А.А. Соловьев  
*Институт прикладной физики РАН  
(ИПФ РАН, Нижний Новгород)*

## Эксперименты по физике плазмы и лабораторной астрофизике на лазере PEARL



# Collaborators



Соловьев А.А. <sup>1</sup>	Степанов А.Н. <sup>1</sup>
Бурдонов К.Ф. <sup>1,3</sup>	Мурзанев А.А. <sup>1</sup>
Котов А.В. <sup>1</sup>	Корытин А.И. <sup>1</sup>
Перевалов С.Е. <sup>1</sup>	Сладков А.Д. <sup>1</sup>
Земсков Р.С. <sup>1</sup>	Коржиманов А.В. <sup>1</sup>
Хазанов Е.А. <sup>1</sup>	Костюков И.Ю. <sup>1</sup>
Гинзбург В.Н. <sup>1</sup>	Голованов А.А. <sup>1</sup>
Кочетков А.А. <sup>1</sup>	Глявин М.Ю. <sup>1</sup>
Кузьмин А.А. <sup>1</sup>	Лучинин А.Г. <sup>1</sup>
Стукачев С.Е. <sup>1</sup>	Гуцин М.Е. <sup>1</sup>
Шайкин И.А. <sup>1</sup>	Коробков С.В. <sup>1</sup>
Шайкин А.А. <sup>1</sup>	Зудин И.Ю. <sup>1</sup>
Яковлев И.В. <sup>1</sup>	Николенко А.С. <sup>1</sup>
	Стриковский А.В. <sup>1</sup>



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



Пикуз С.А.<sup>3</sup>  
Андреев Н.Е.<sup>3</sup>



Rosmej O.N.<sup>4</sup>



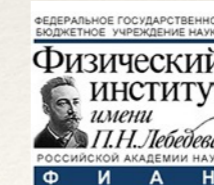
Chiardi A.<sup>5</sup>



Бискало Д.В.<sup>6</sup>

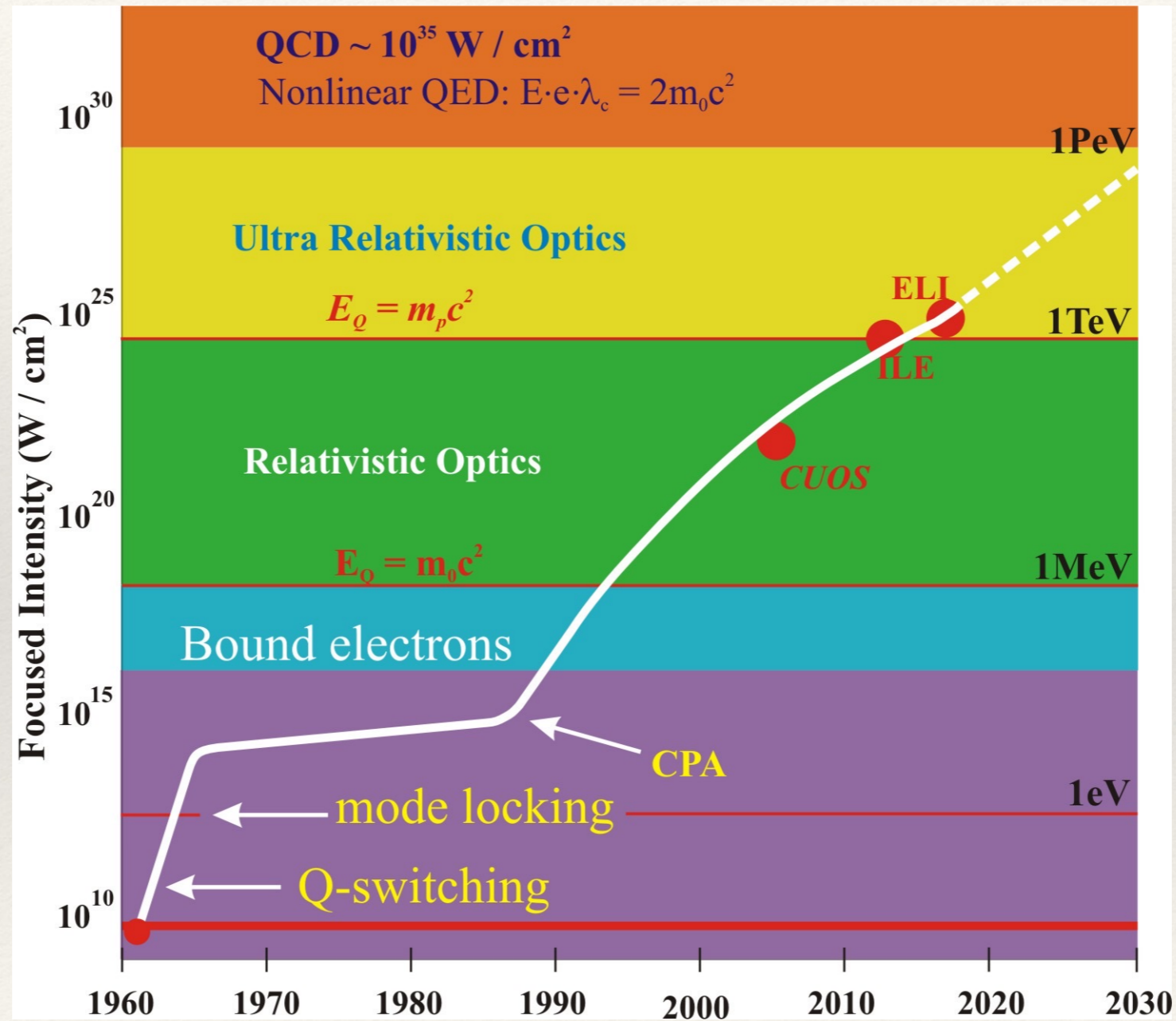


Пухов А.М.<sup>7</sup>



Быченков В.Ю.<sup>8</sup>  
Борисенко Н.Г.<sup>8</sup>

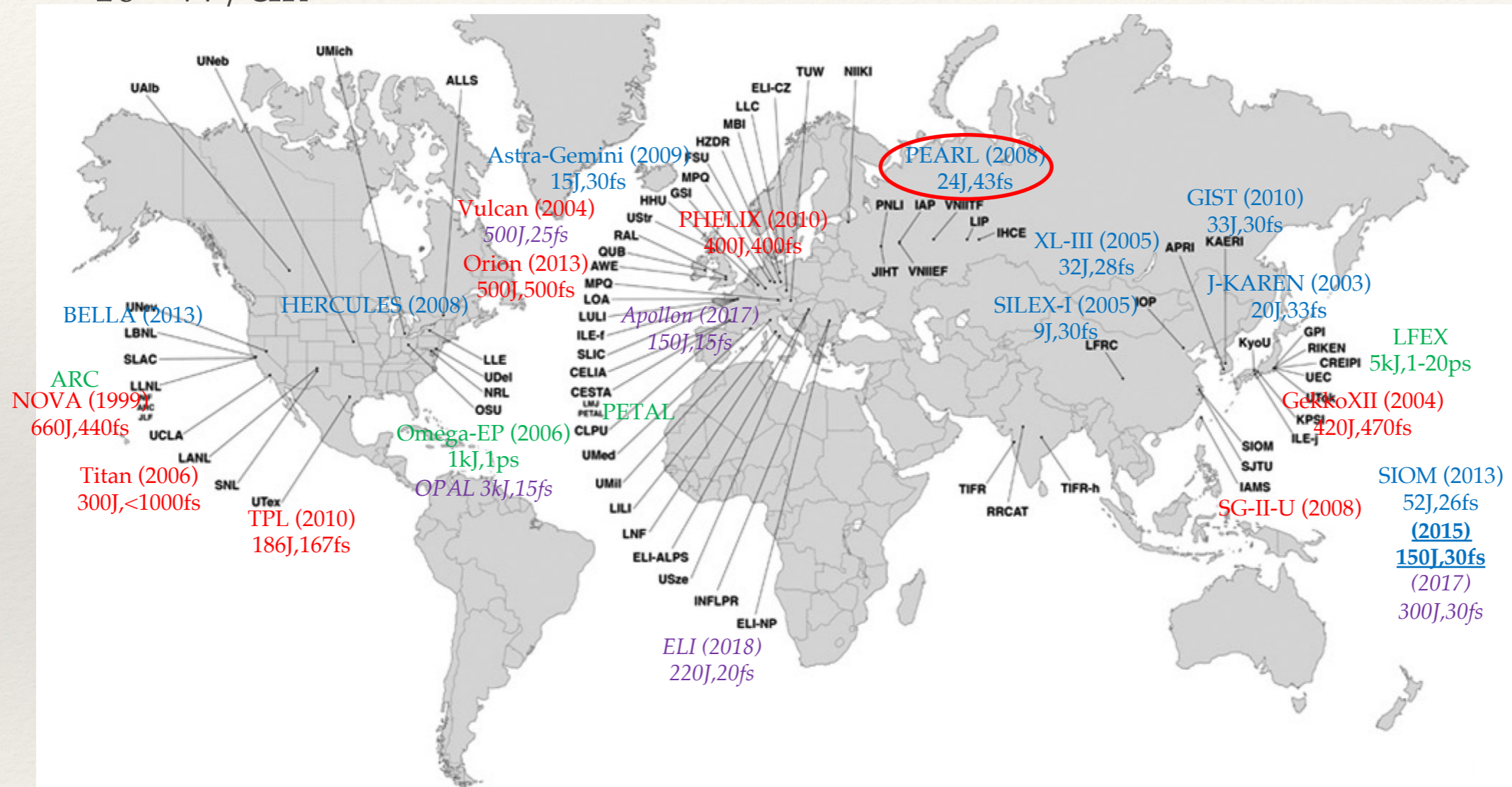
# Ultra-high intensity lasers



Mourou (2011)

# Ultra-high intensity lasers

$> 10^{19} \text{ W/cm}^2$



ICUIL World Map of Ultrahigh Intensity Laser Capabilities

Terry Kessler, ICUIL Secretary ICUIL News – June 2016 – 3

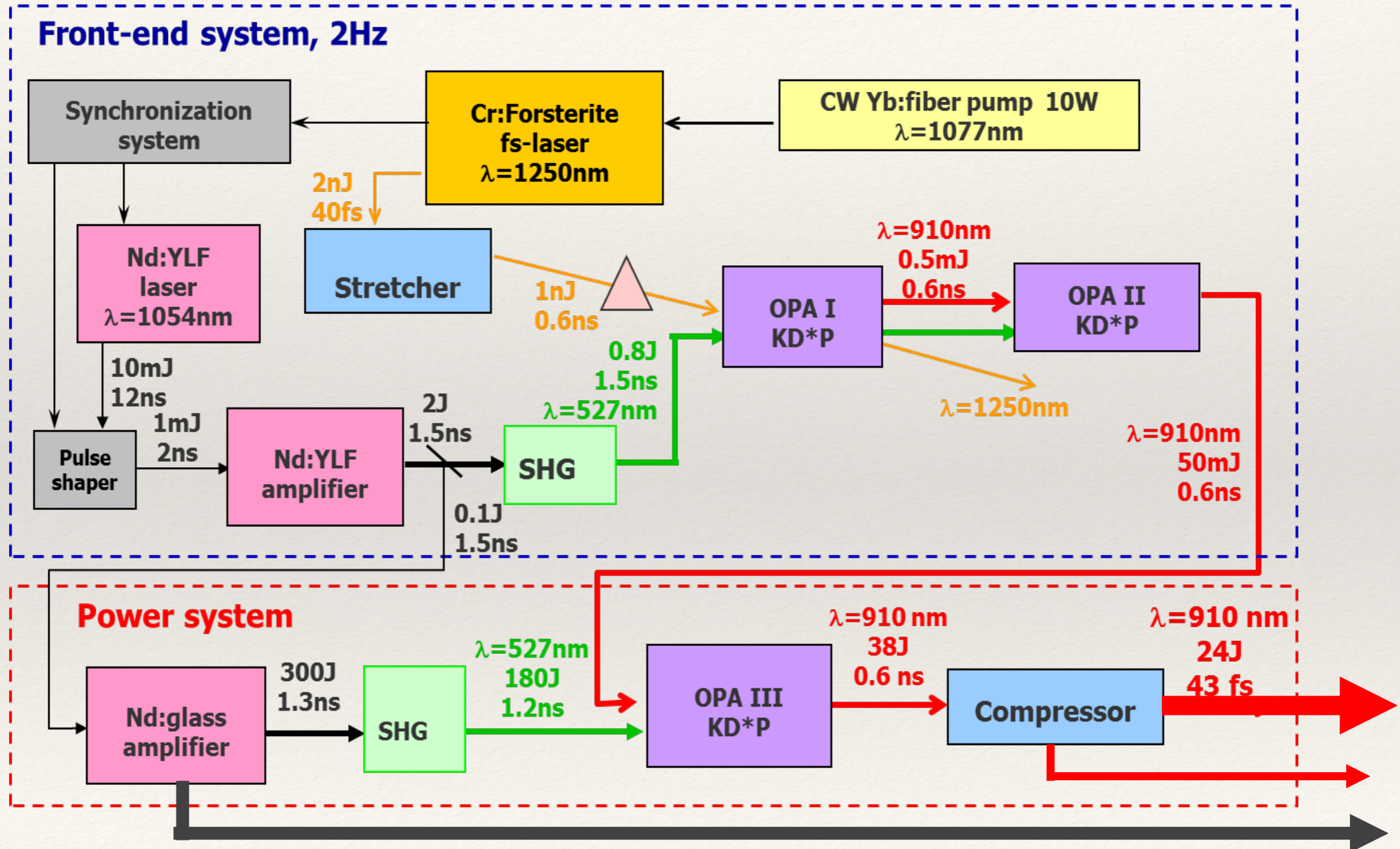




- 3 beams:
- Long: 1 ns, 300 J
  - Short: 50 fs, 30 J
  - Probe: 50 fs, 10 mJ

PEARL team at IAP (Nizhny Novgorod)  
*(PEtawatt pARametrical Laser)*

# PW OPCPA PEARL laser facility



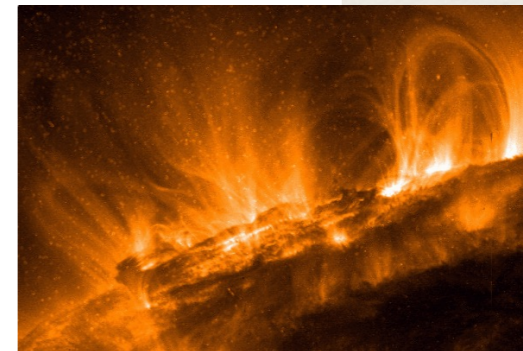
# Лазерно-плазменное взаимодействие: нс и фс

In short, two types of lasers correspond (in general) to two types of plasmas

1. **Maximum energy** lasers  $\Leftrightarrow$  **long pulses** ( $\sim$ ns)

$\rightarrow$  “thermal” plasma,  
 $\sim$ at equilibrium,  
dense (compressed/solid/expanding)  
& hot (eV-keV)

$\updownarrow$   
high-velocity



2. **Highest power** lasers  $\Leftrightarrow$  **short pulses** ( $\sim$ ps-fs)  $\Leftrightarrow$  maximum intensity  $\Leftrightarrow$  maximum E-field

$\rightarrow$  “kinetic plasma”  
strong out-of-equilibrium  
very high energy electrons





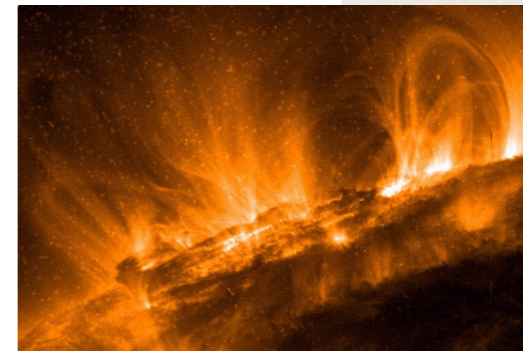
# Лабораторная астрофизика с использованием лазеров

In short, two types of lasers correspond (in general) to two types of plasmas

1. **Maximum energy** lasers  $\Leftrightarrow$  **long pulses** ( $\sim$ ns)

$\rightarrow$  “thermal” plasma,  
 $\sim$ at equilibrium,  
dense (compressed/solid/expanding)  
& hot (eV-keV)

$\updownarrow$   
high-velocity

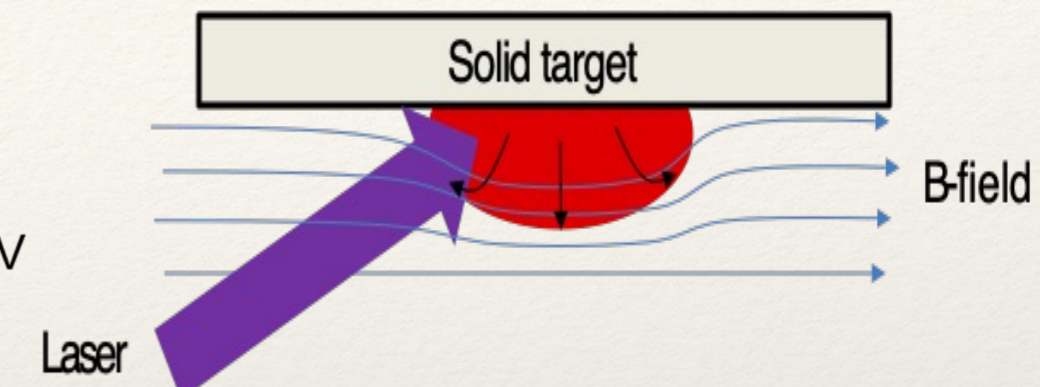
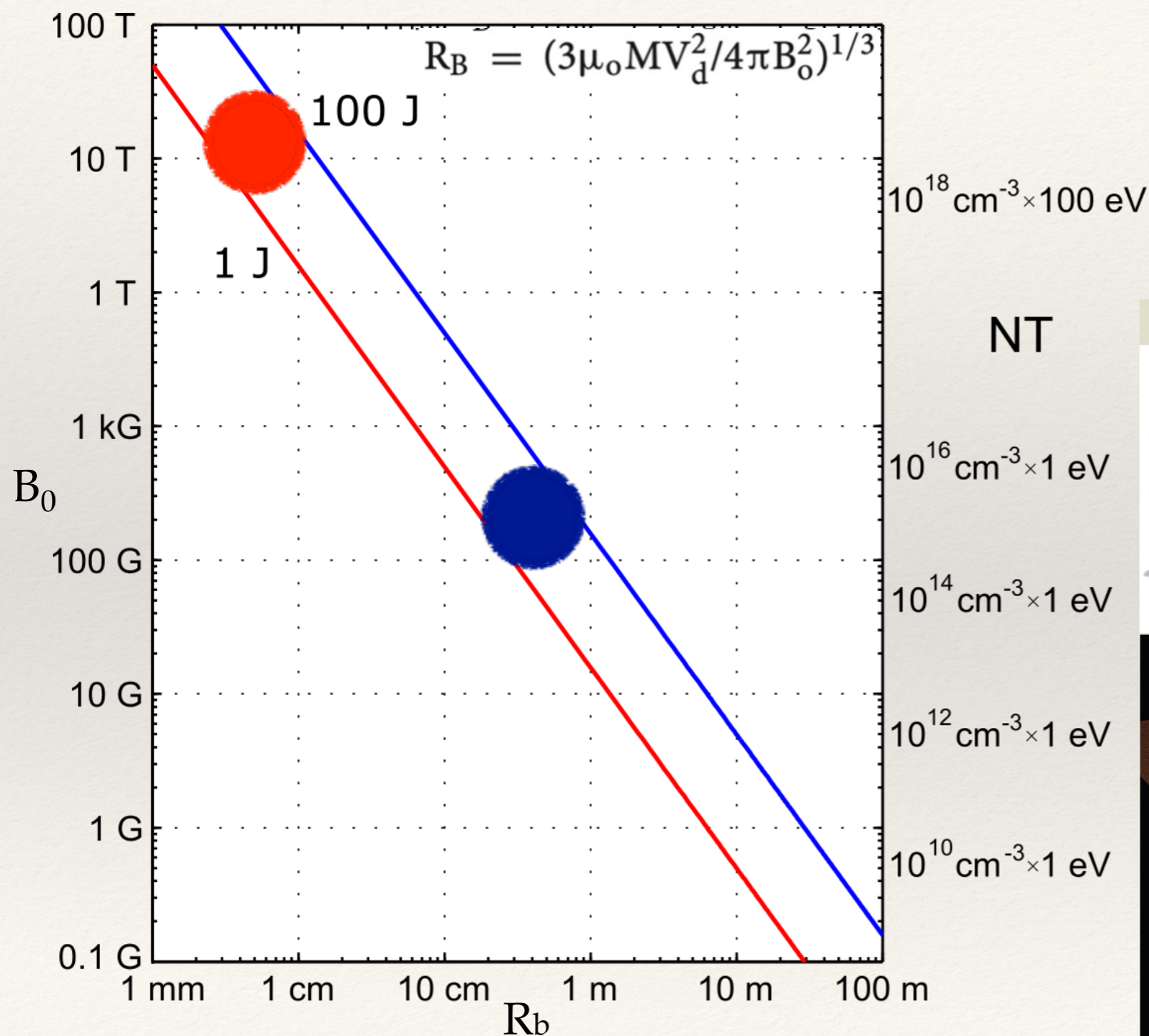


2. **Highest power** lasers  $\Leftrightarrow$  **short pulses** ( $\sim$ ps-fs)  $\Leftrightarrow$  maximum intensity  $\Leftrightarrow$  maximum E-field

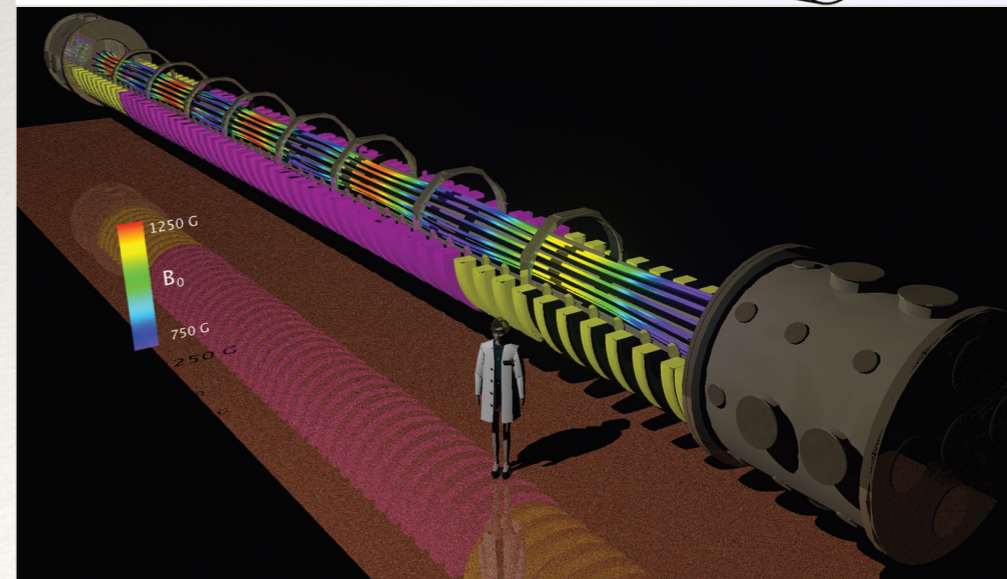
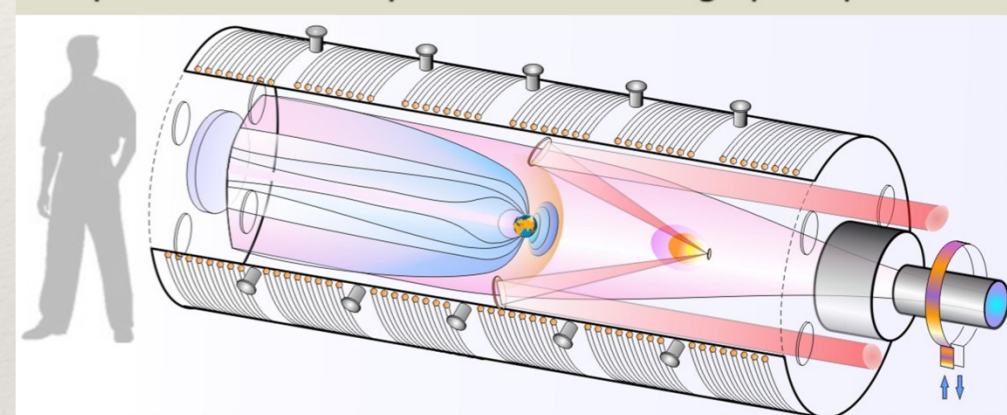
$\rightarrow$  “kinetic plasma”  
strong out-of-equilibrium  
very high energy electrons



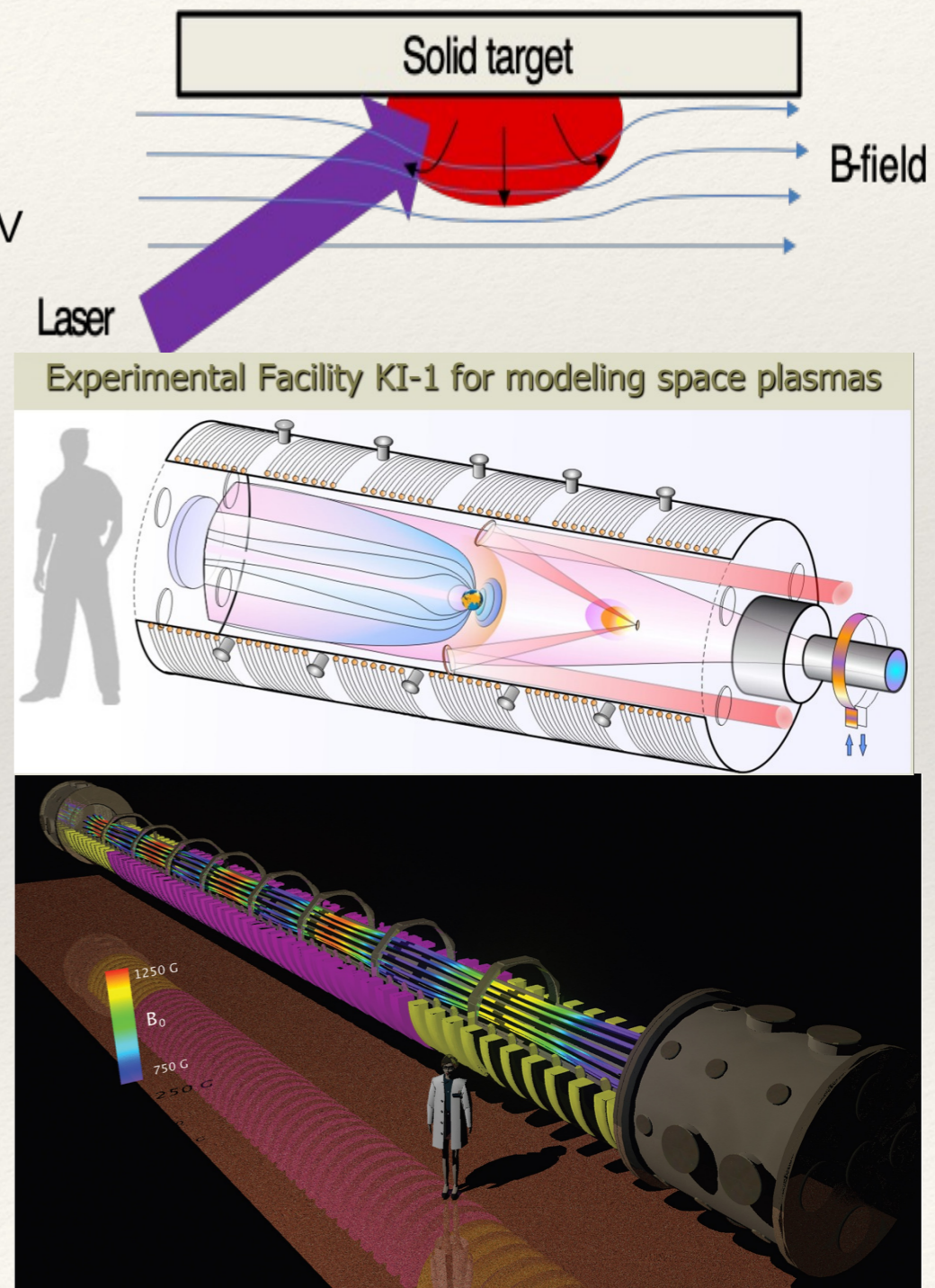
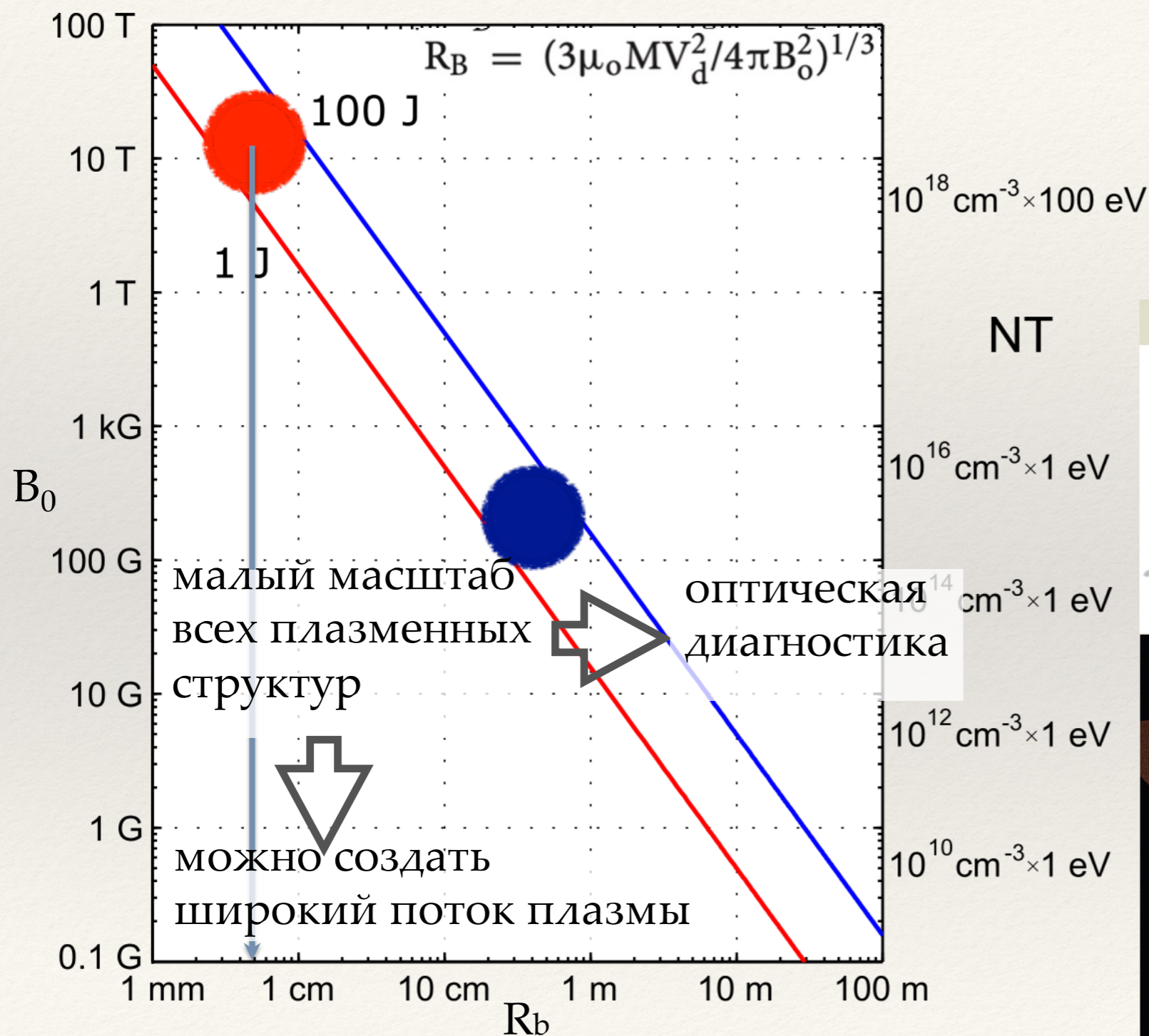
# Моделирование МГД процессов: особенности постановки экспериментов с сильным $B_0$



Experimental Facility KI-1 for modeling space plasmas

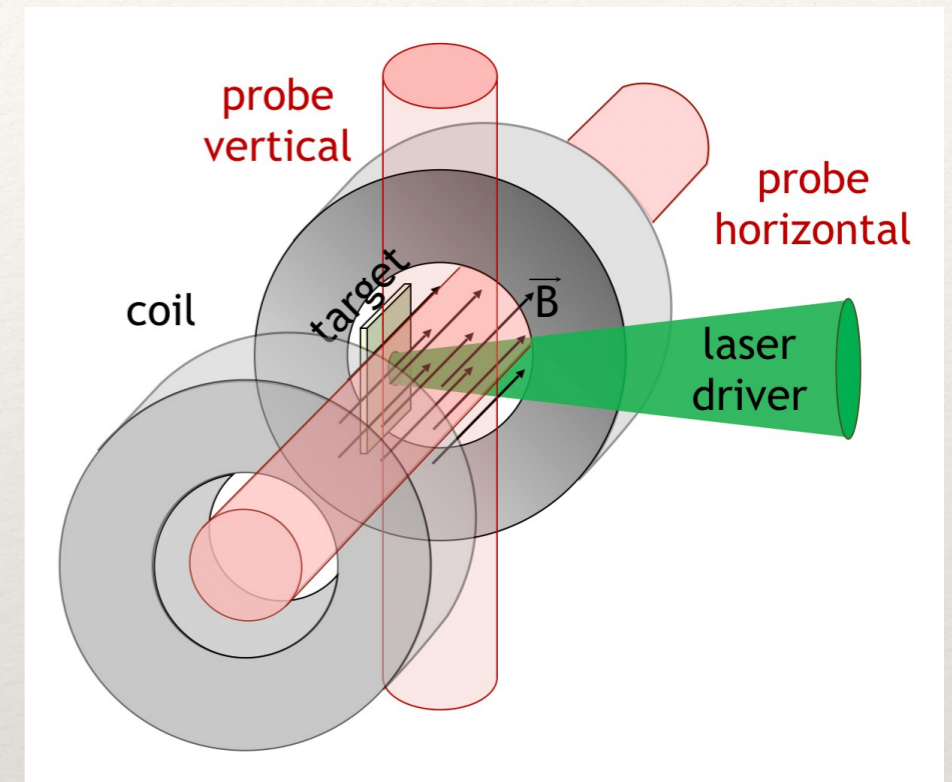
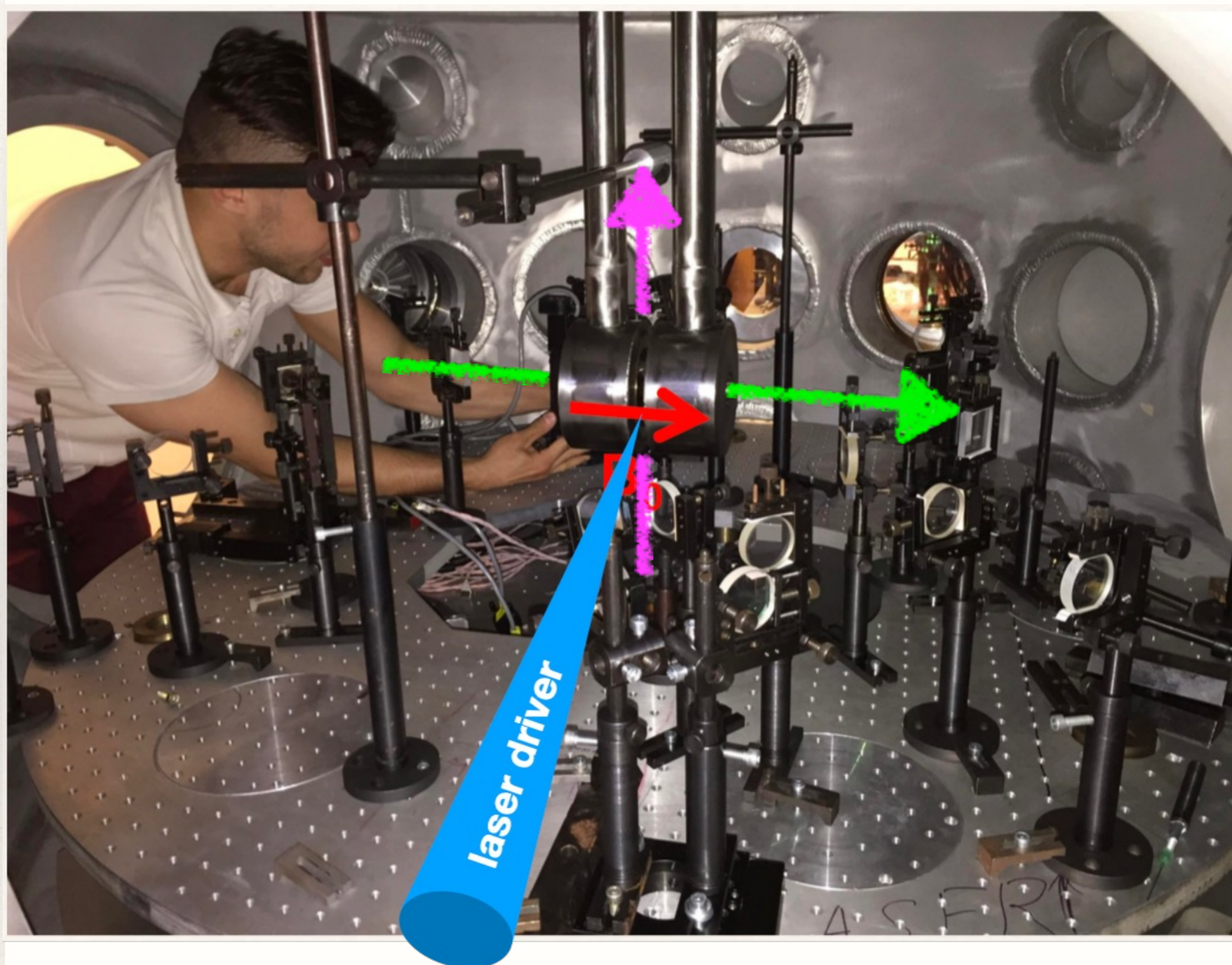


# Моделирование МГД процессов: особенности постановки экспериментов с сильным $B_0$



# Моделирование МГД процессов: постановка эксперимента

Luchinin A.G., Malyshev V.A., Kopelovich E.A. et al. [Review of Scientific Instruments](#). 2021. Т. 92. № 12. С. 123506.



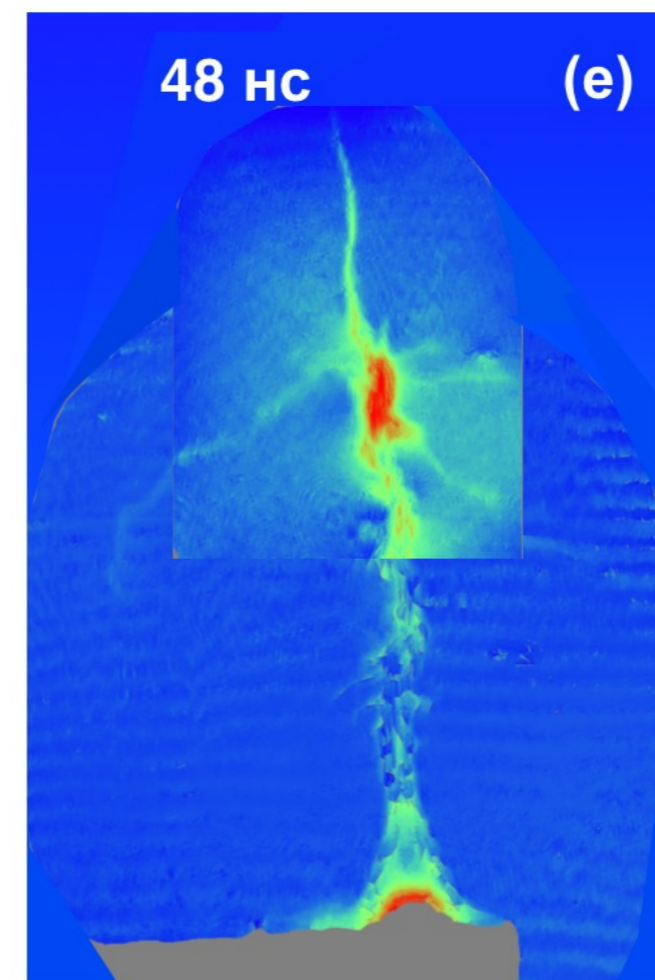
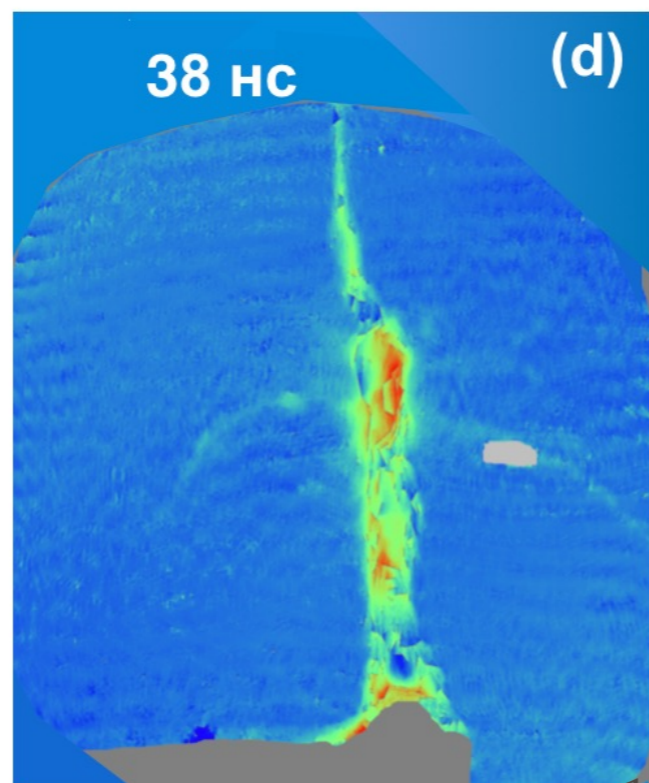
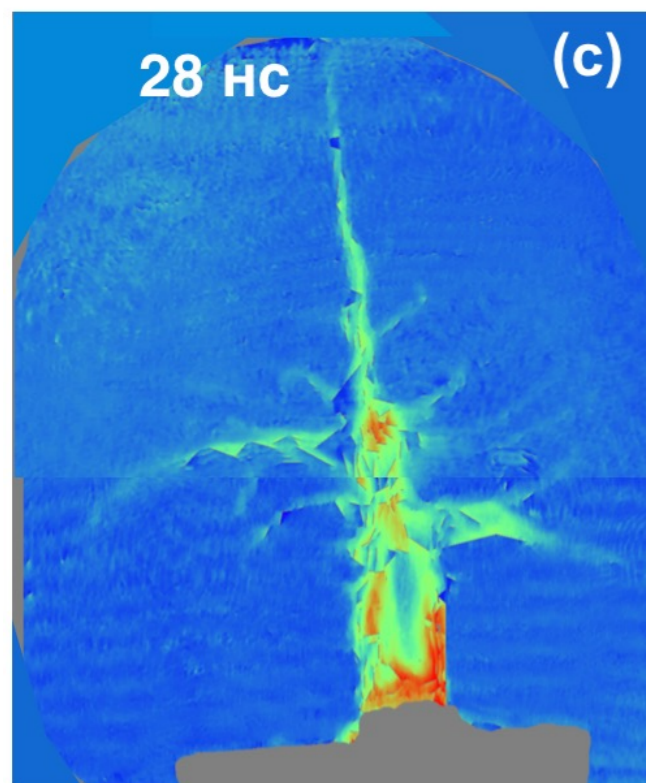
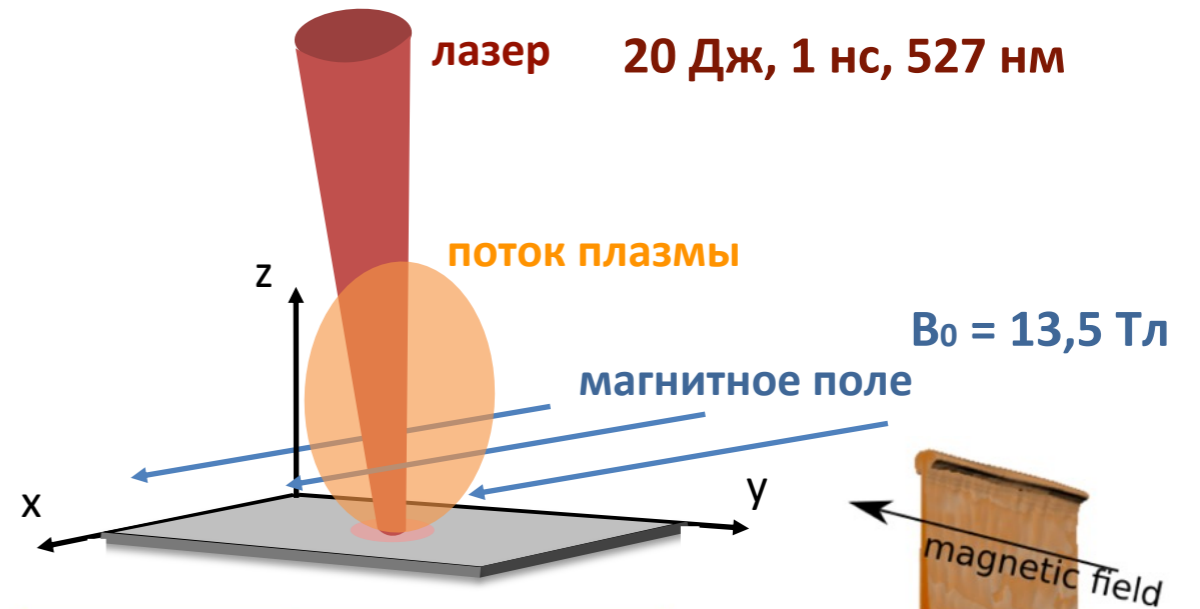
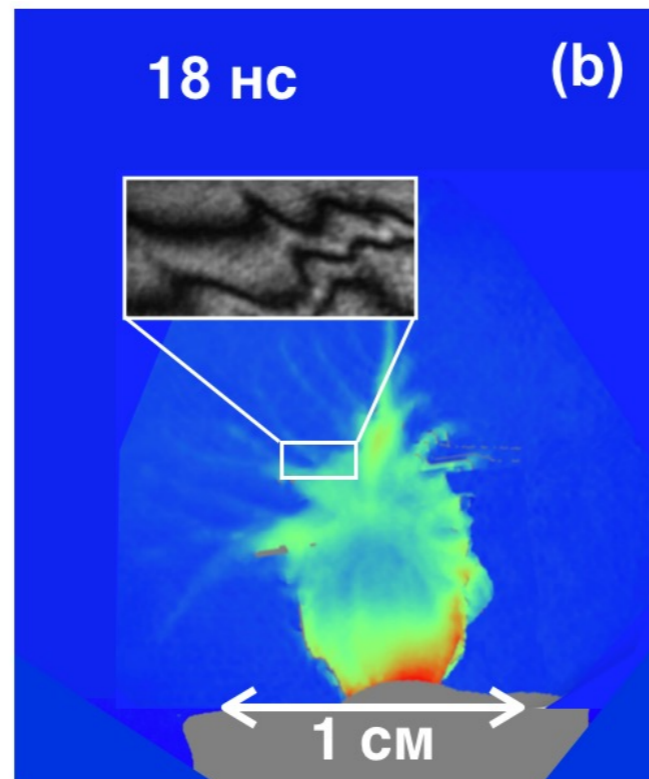
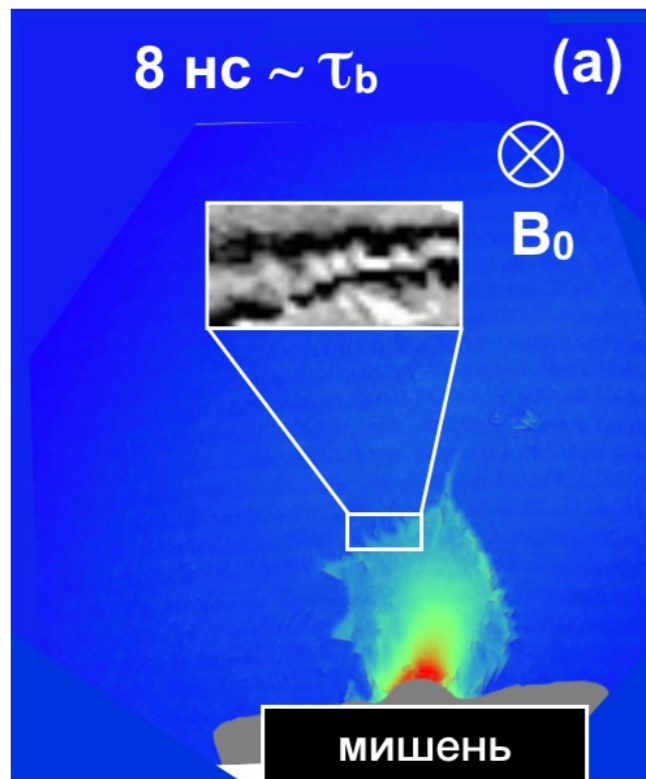
## Laser driver :

- 1 ns, 15 J, 1054/527 nm,  $10^{11}$ - $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>
- 50 fs, 15 J, 910 nm,  $10^{17}$ - $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>

Мишенная камера стенда PEARL  
с установленной 15 Тл магнитной системой

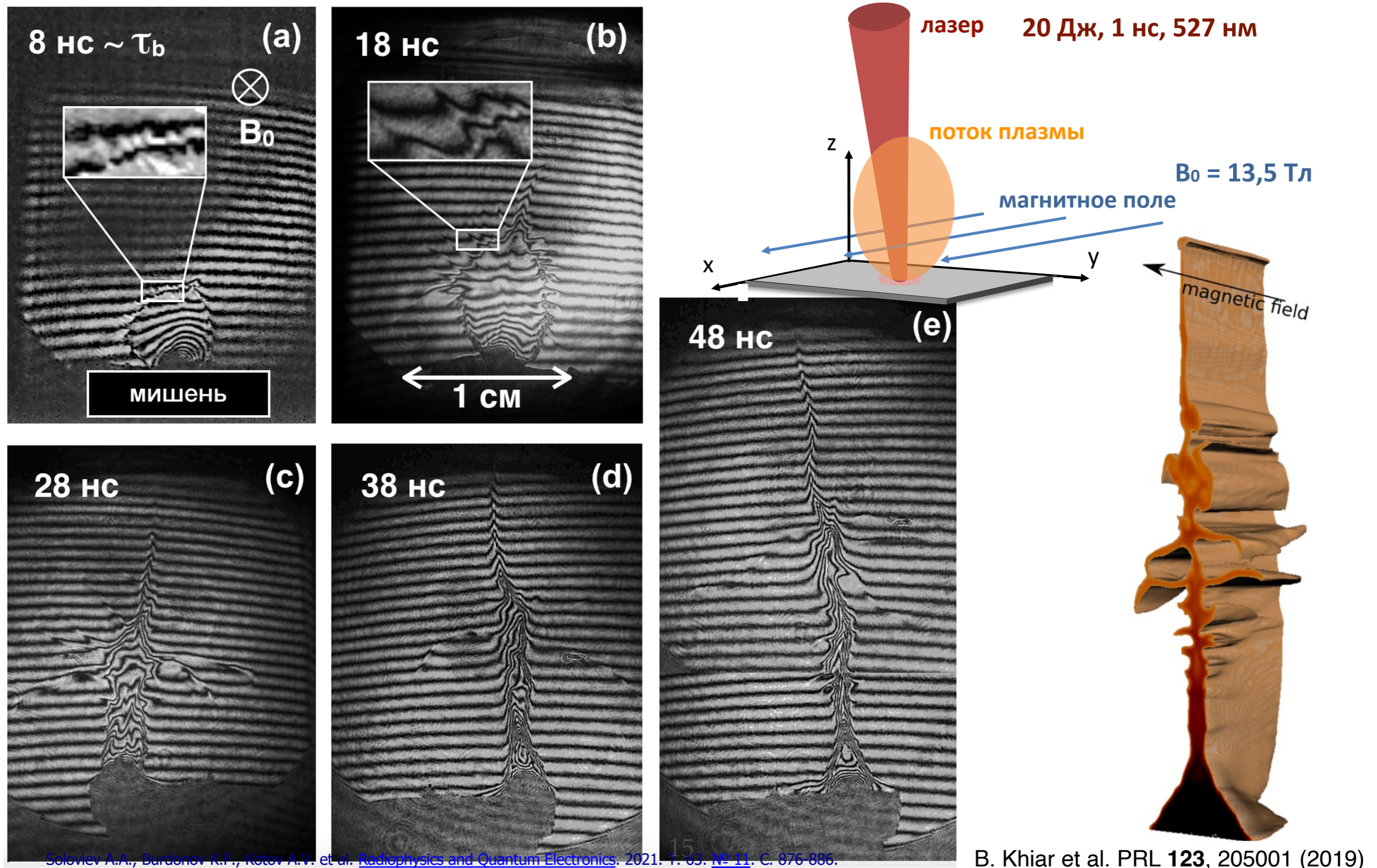
# Моделирование МГД процессов:

Разлет высокоскоростного потока лазерной плазмы во внешнее магнитное поле

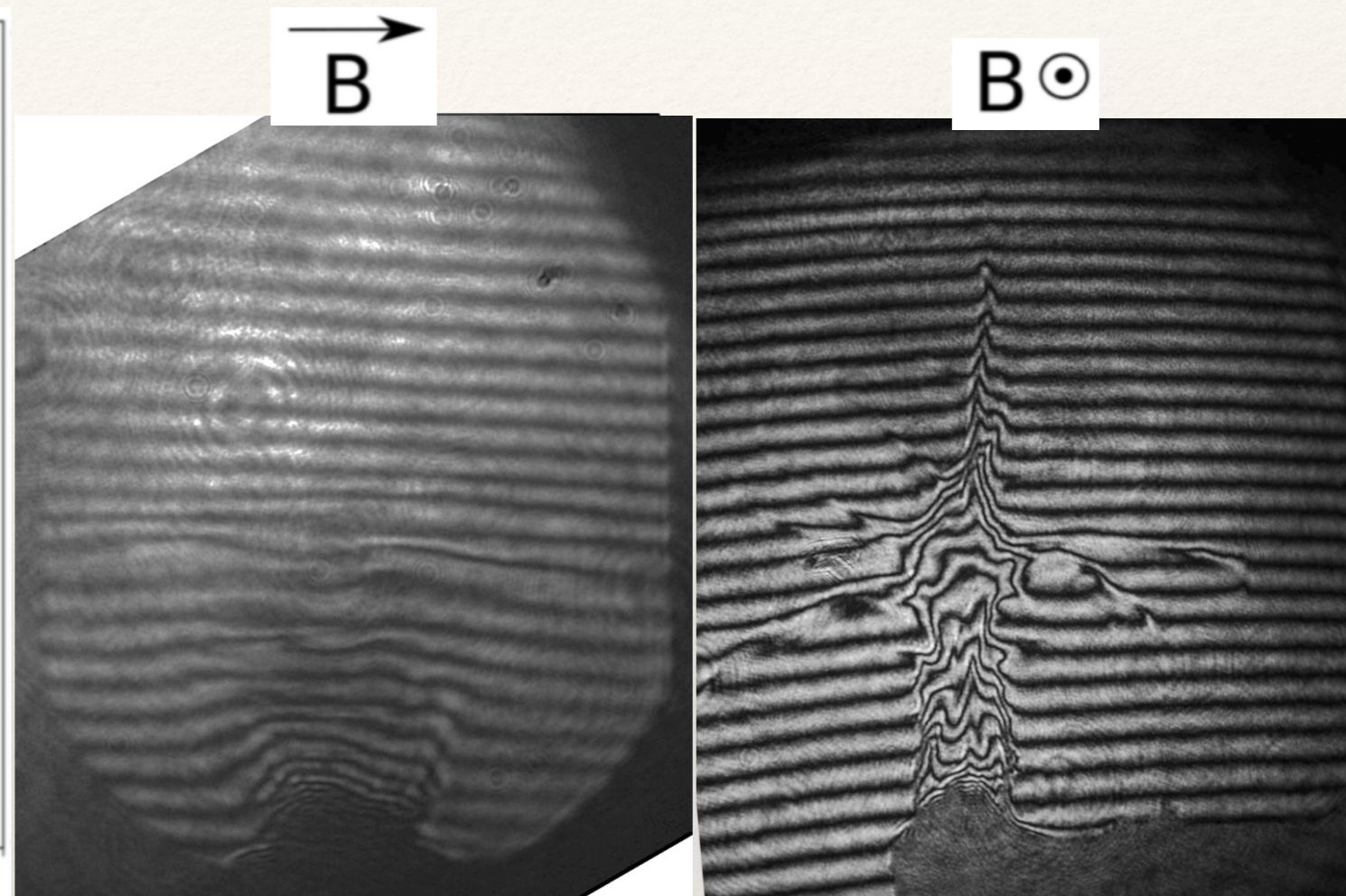
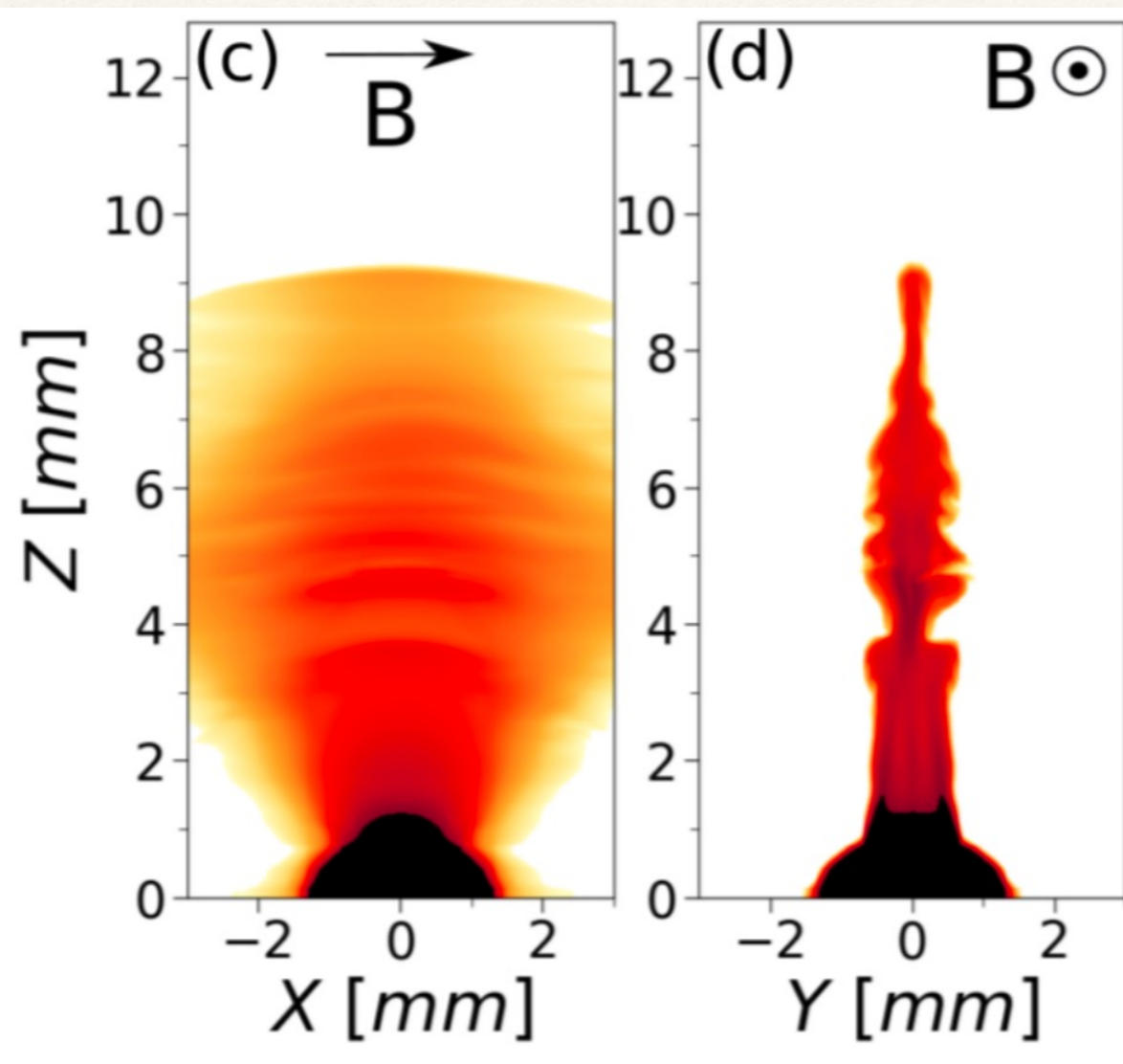


# Моделирование МГД процессов:

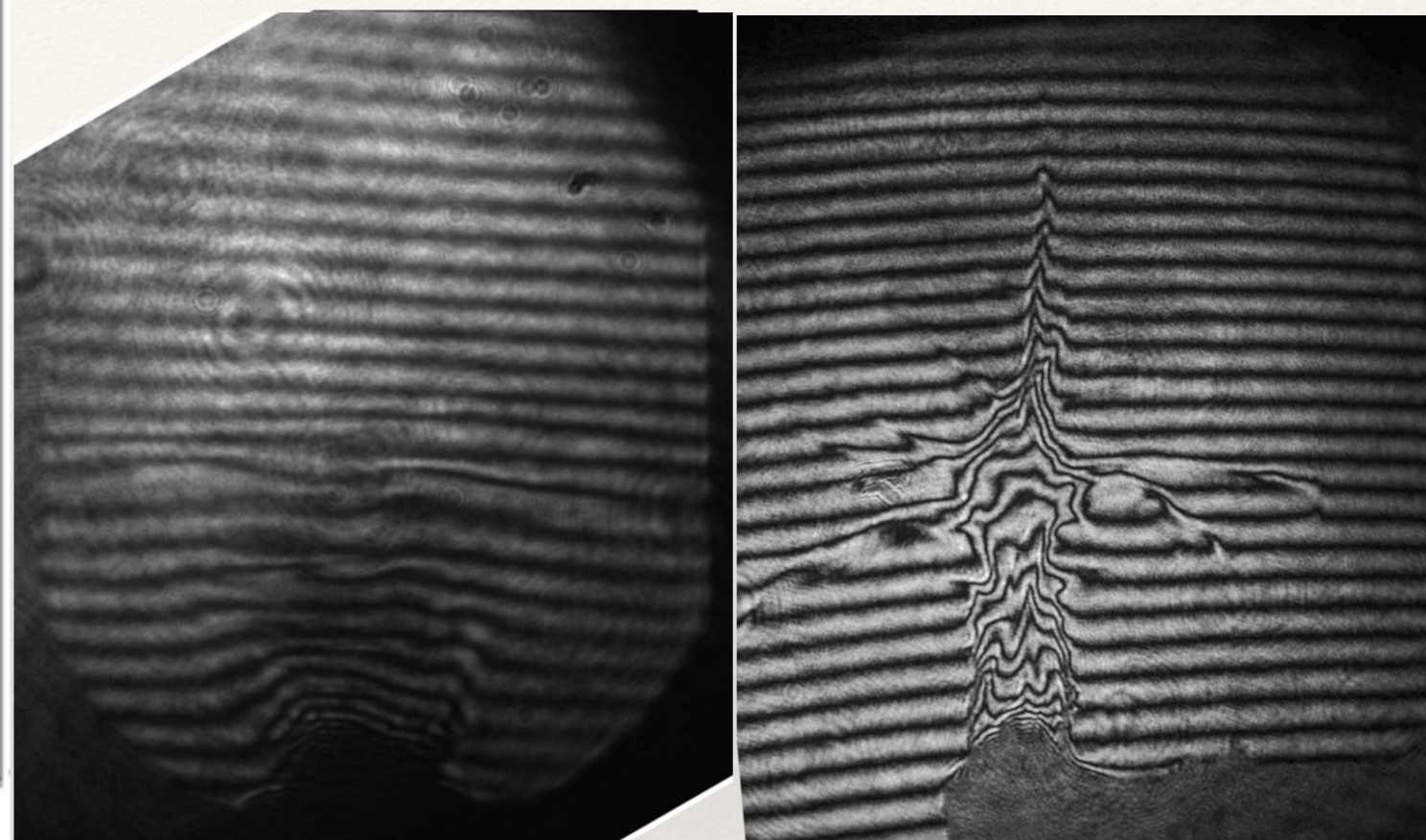
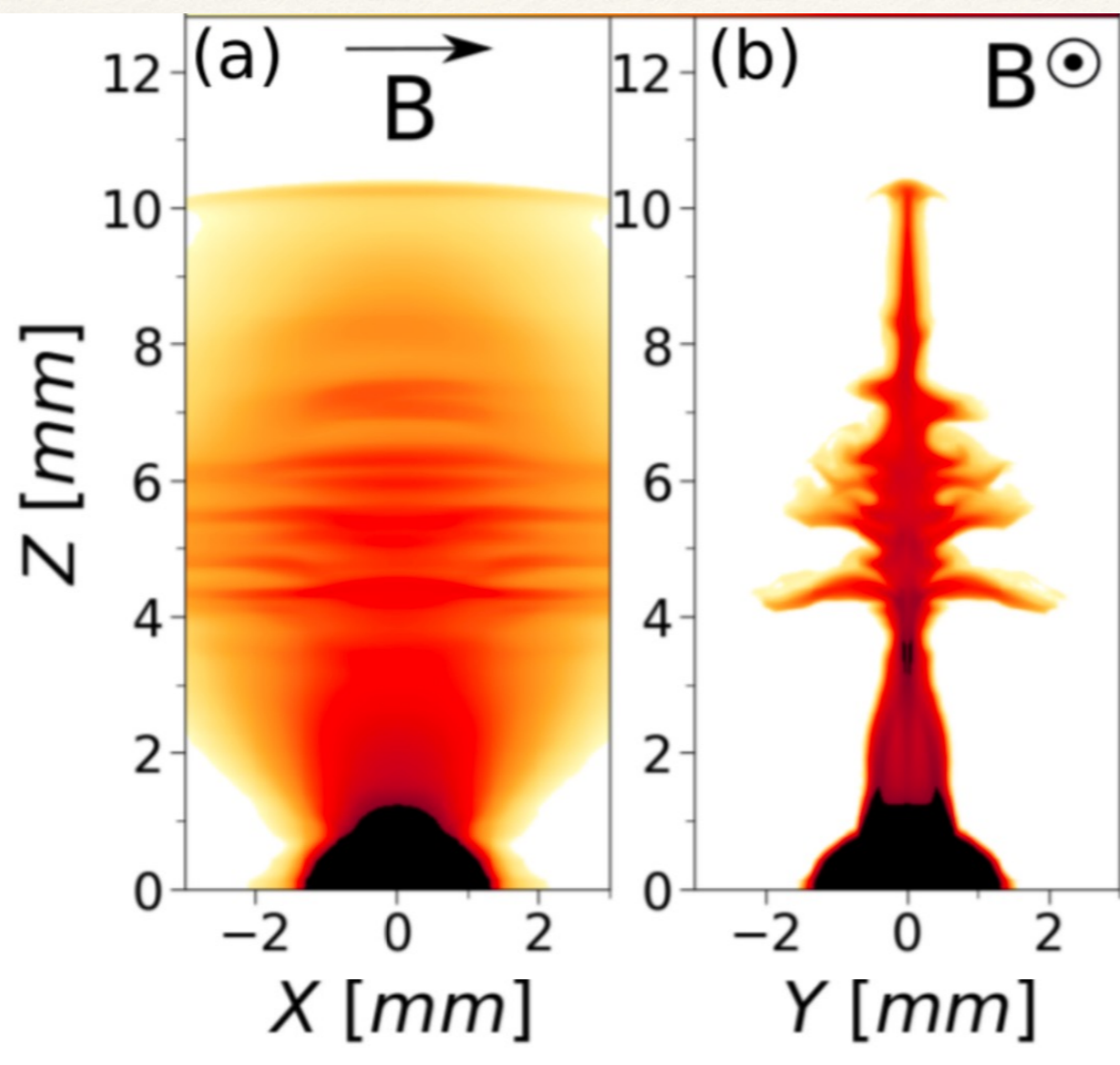
Разлет высокоскоростного потока лазерной плазмы во внешнее магнитное поле



# Разлет плазмы во внешнее магнитное поле. Холловская МГД.

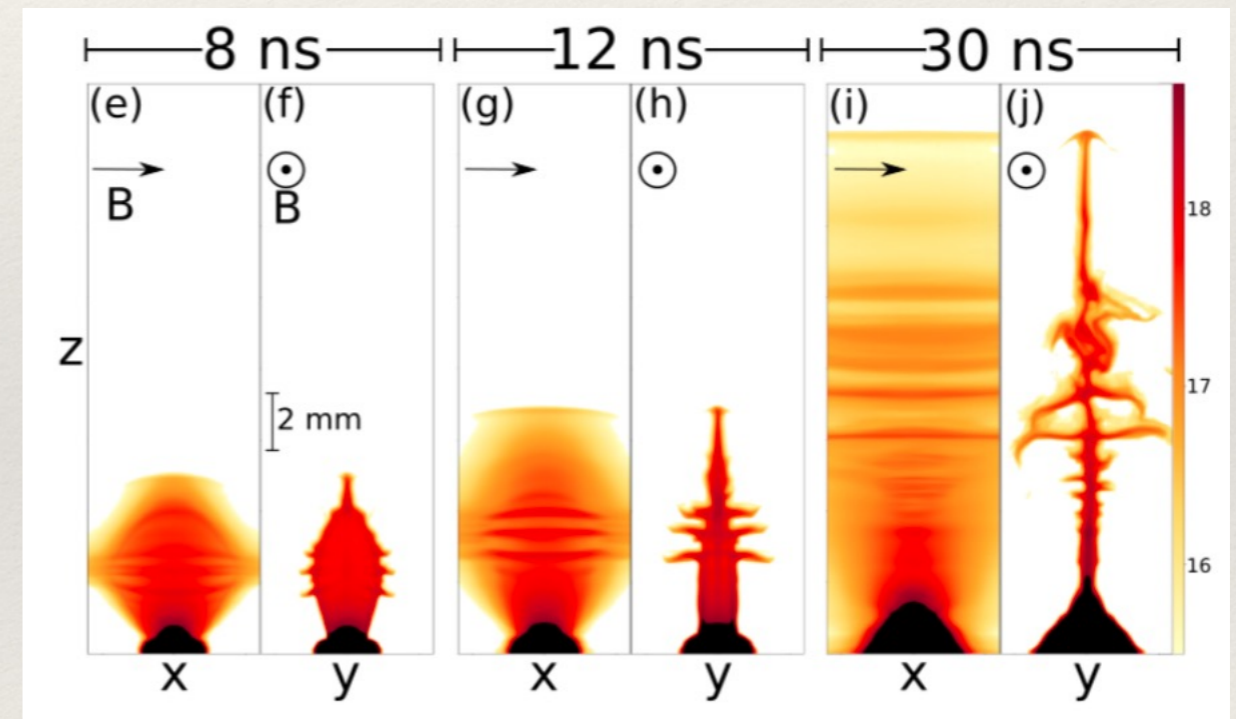
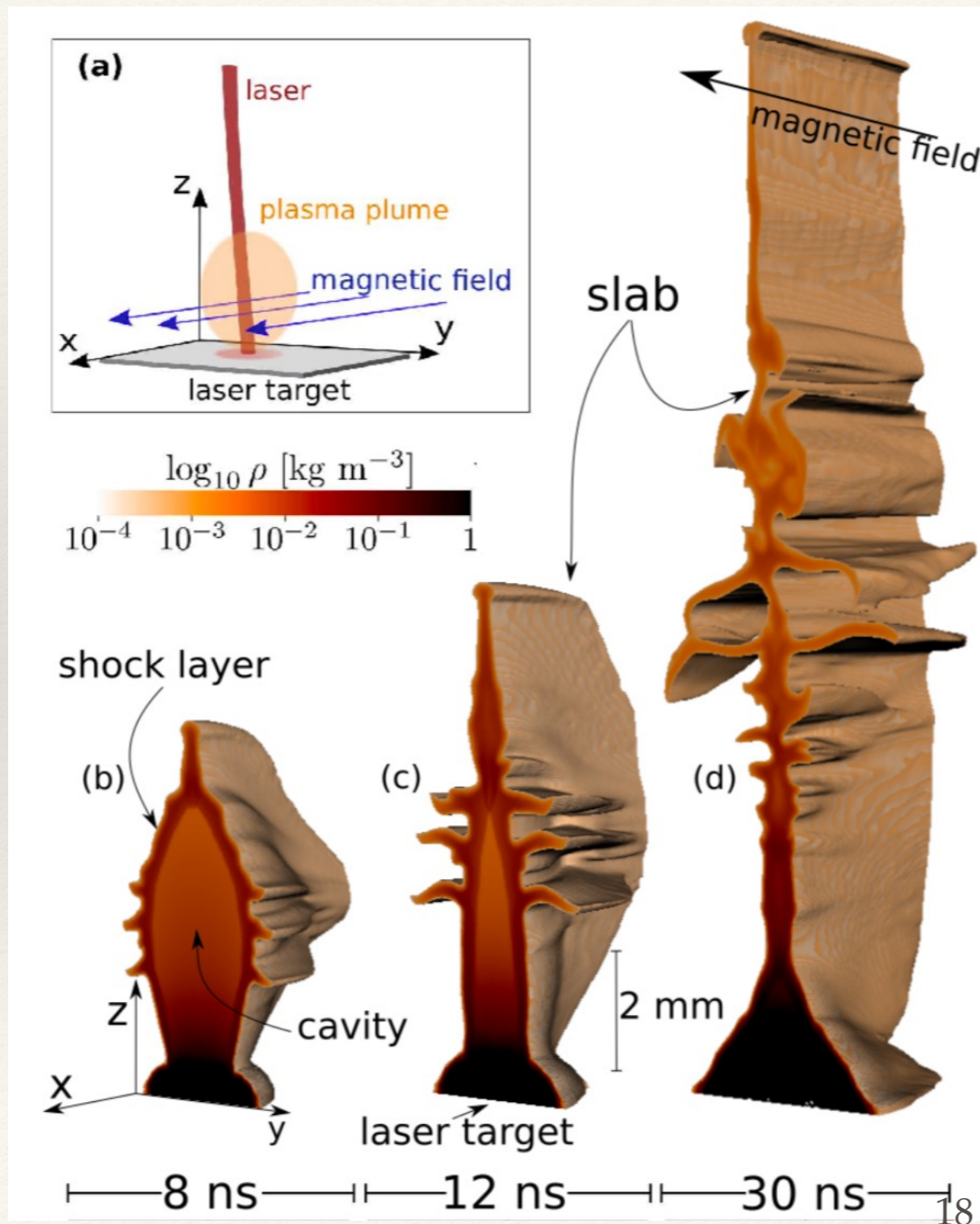


Разлет плазмы во внешнее магнитное поле.  
Холловская МГД + Аномальное сопротивление.

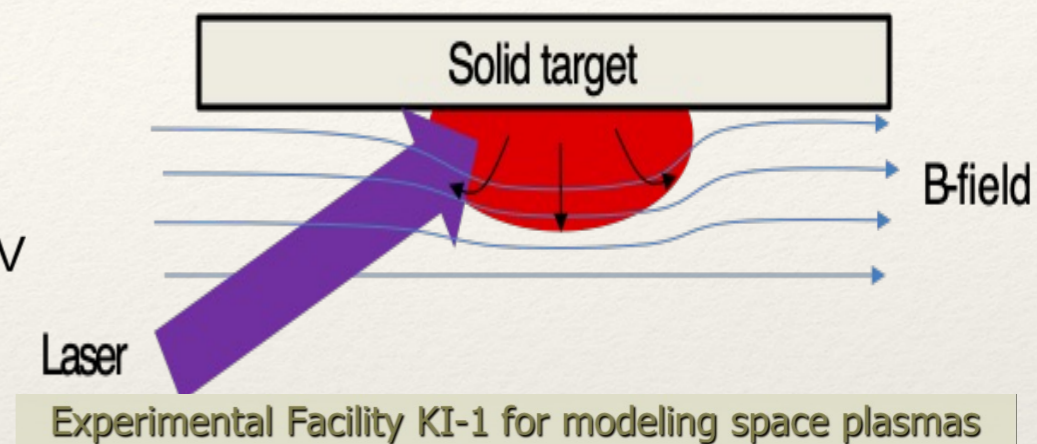
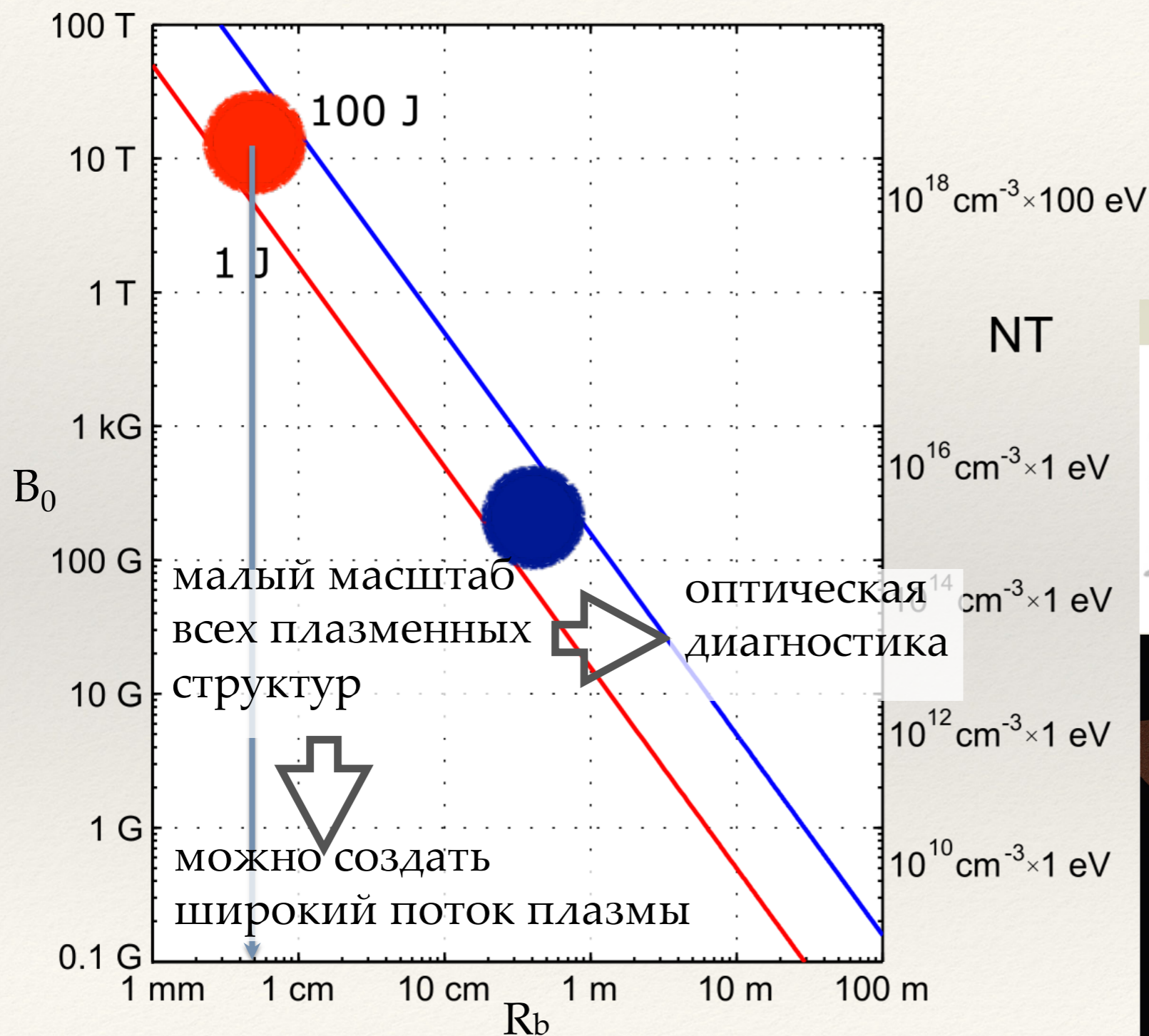




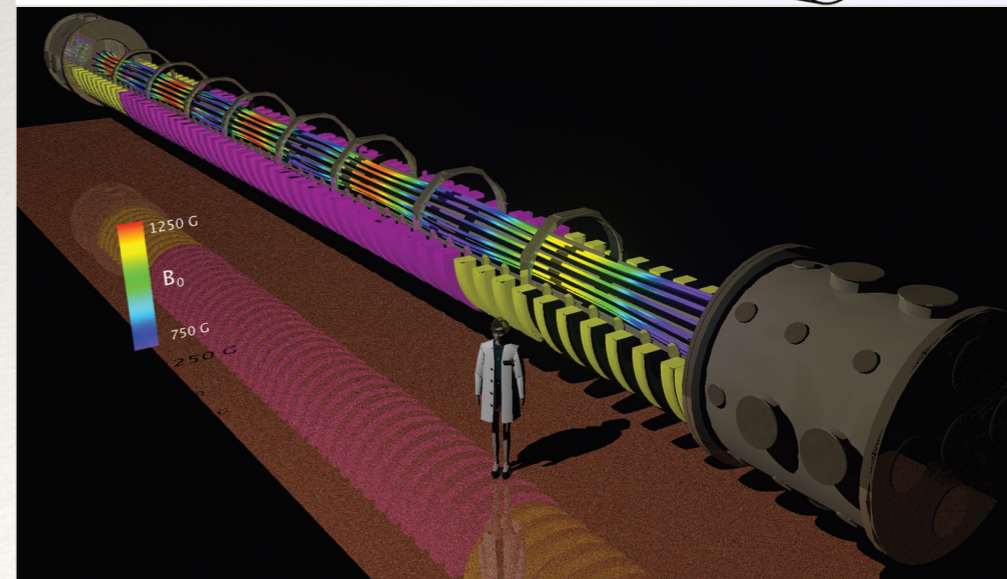
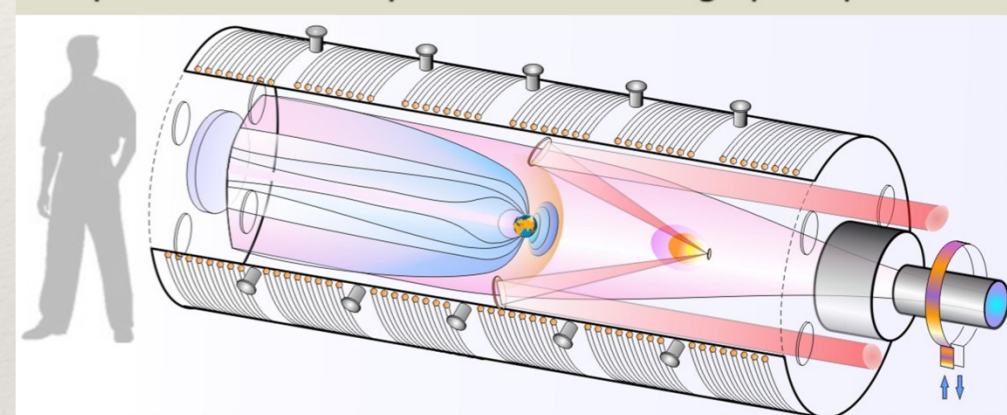
# Разлет плазмы во внешнее магнитное поле. Холловская МГД + Аномальное сопротивление.



# Моделирование МГД процессов: особенности постановки экспериментов с сильным $B_0$

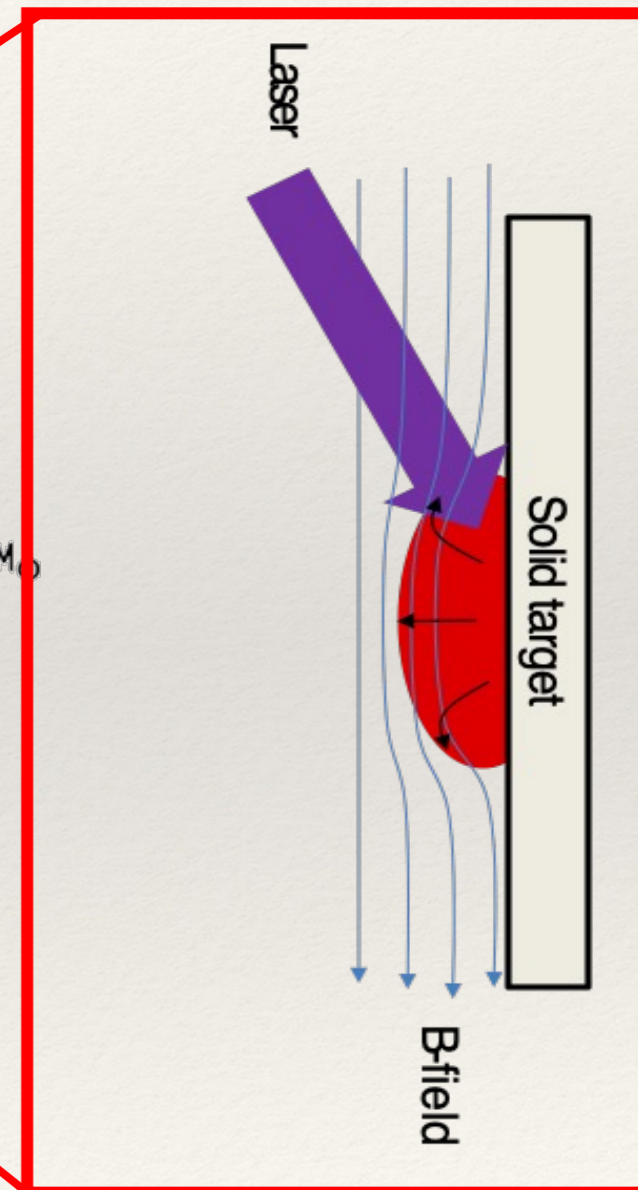
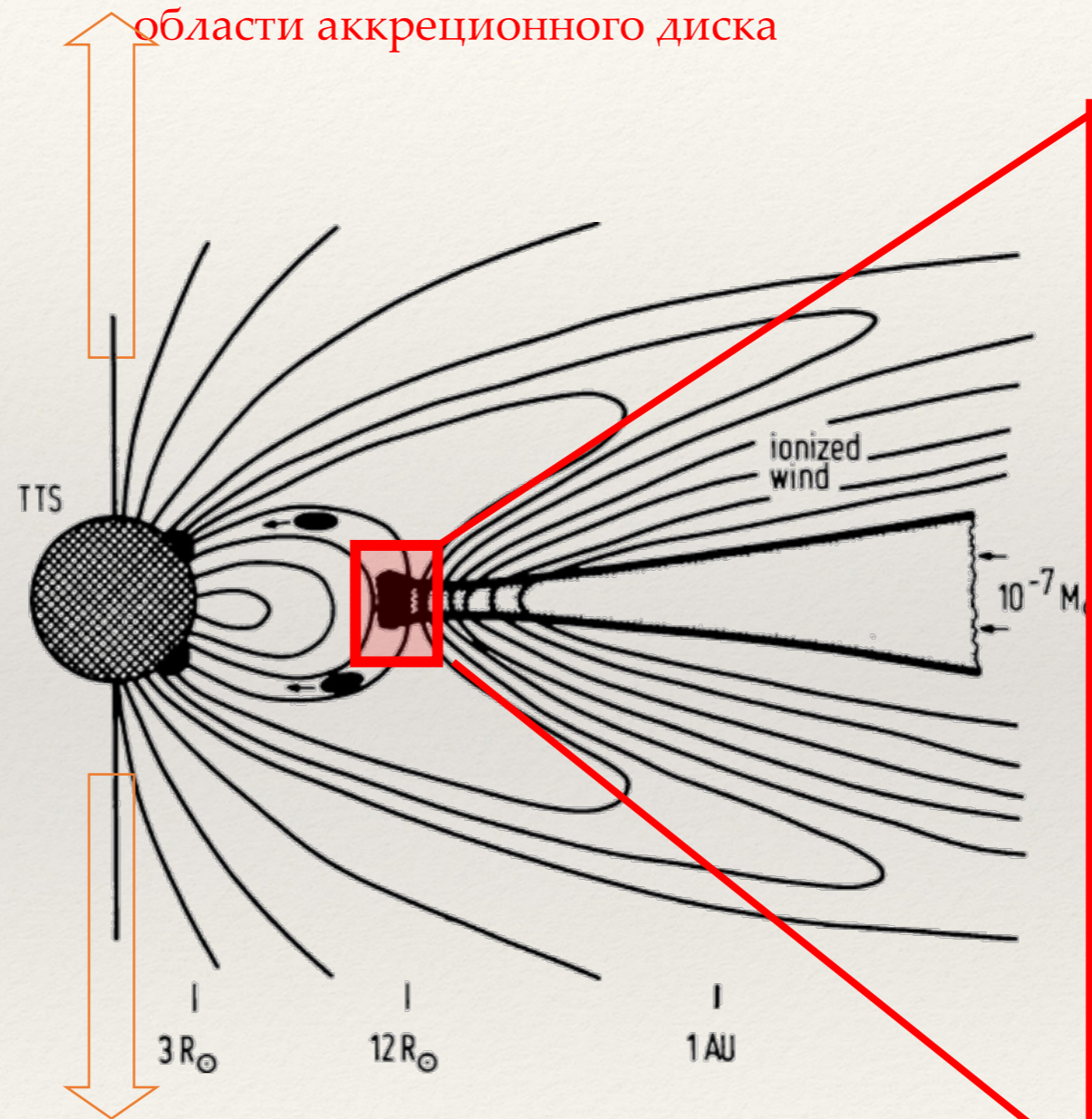
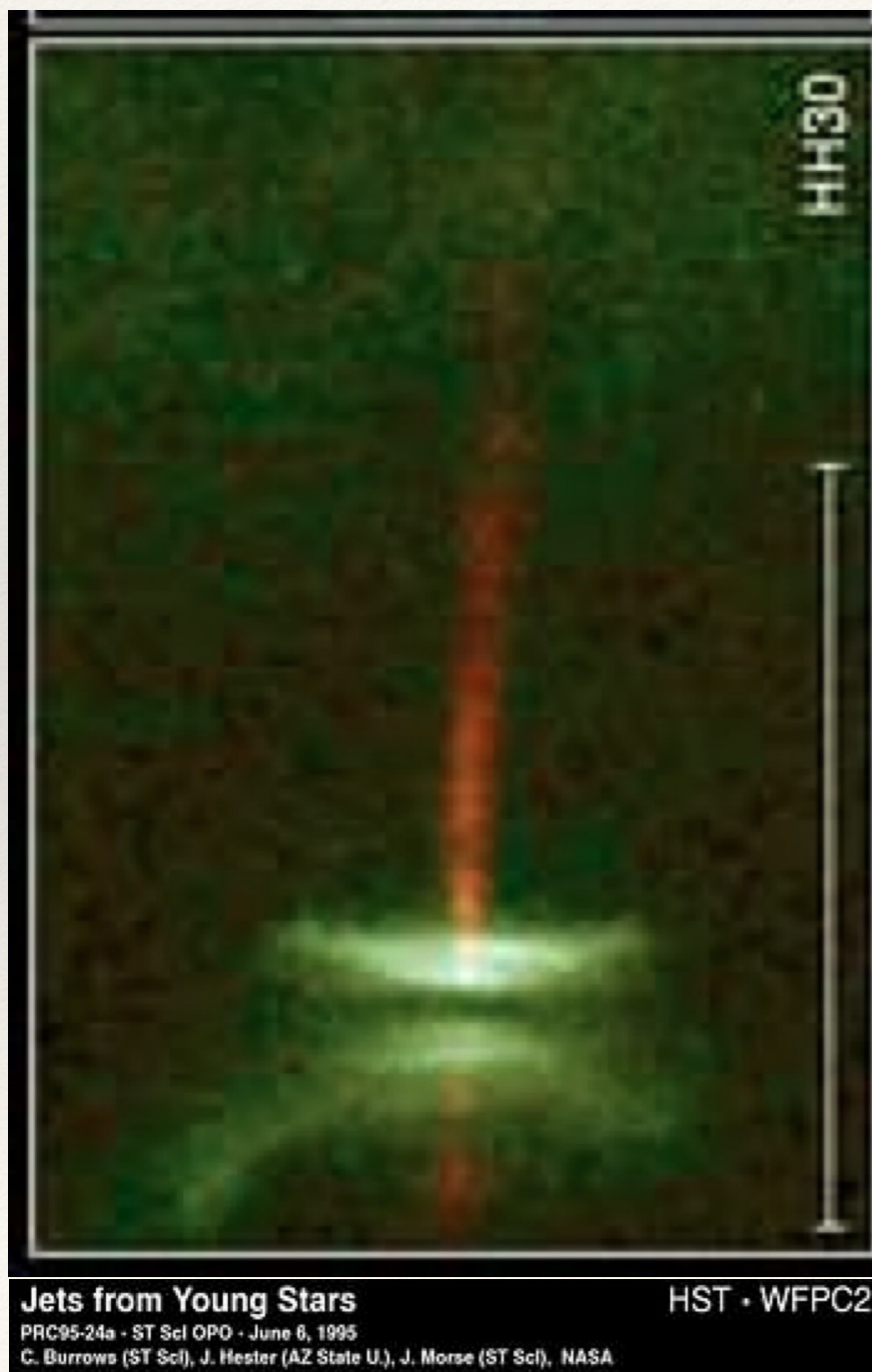


Experimental Facility KI-1 for modeling space plasmas



# Астрофизические МГД плазменные процессы

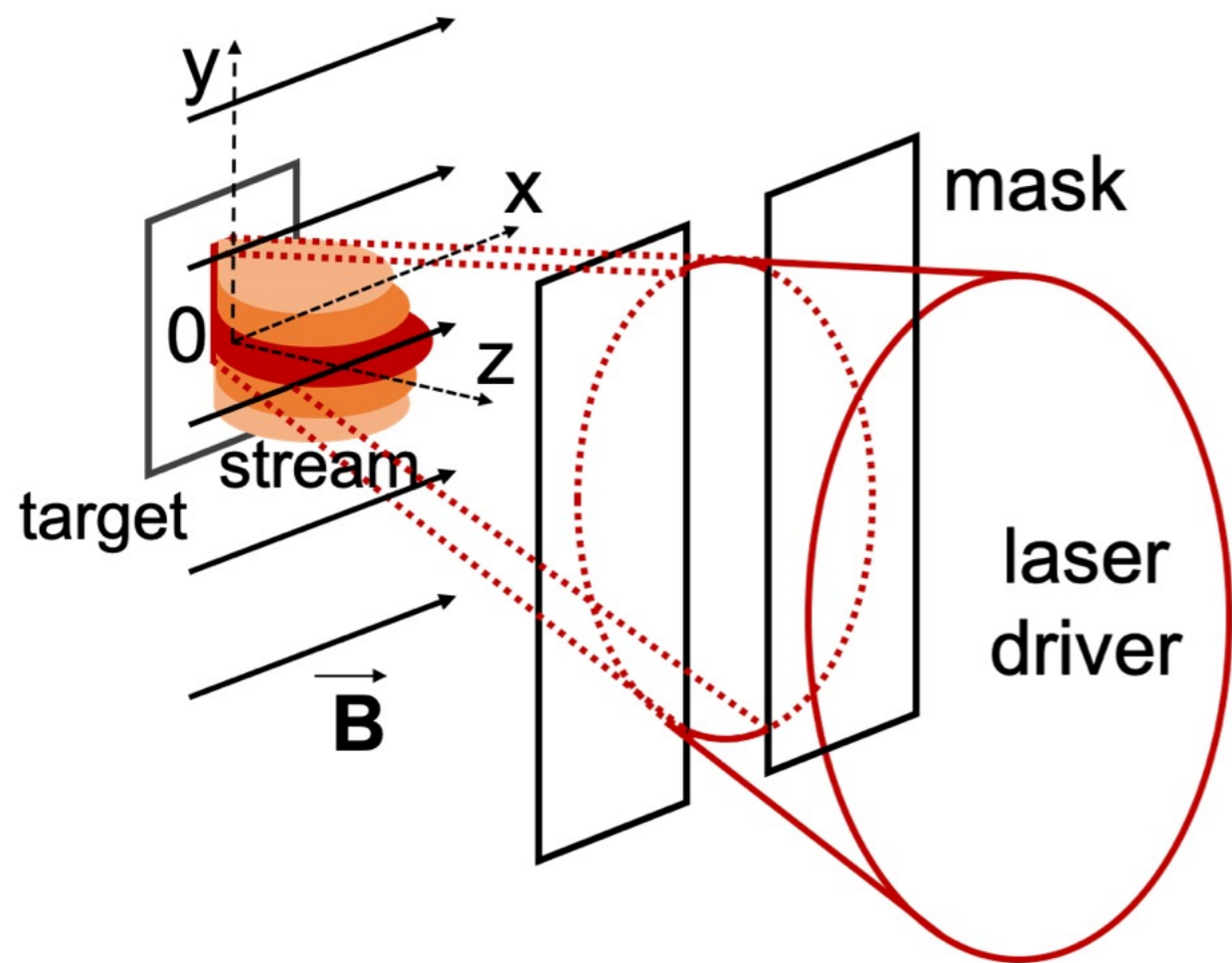
- ❖ Моделирование МГД плазменных процессов: динамика внутренней области аккреционного диска



Adapted from Camenzind, (1990).

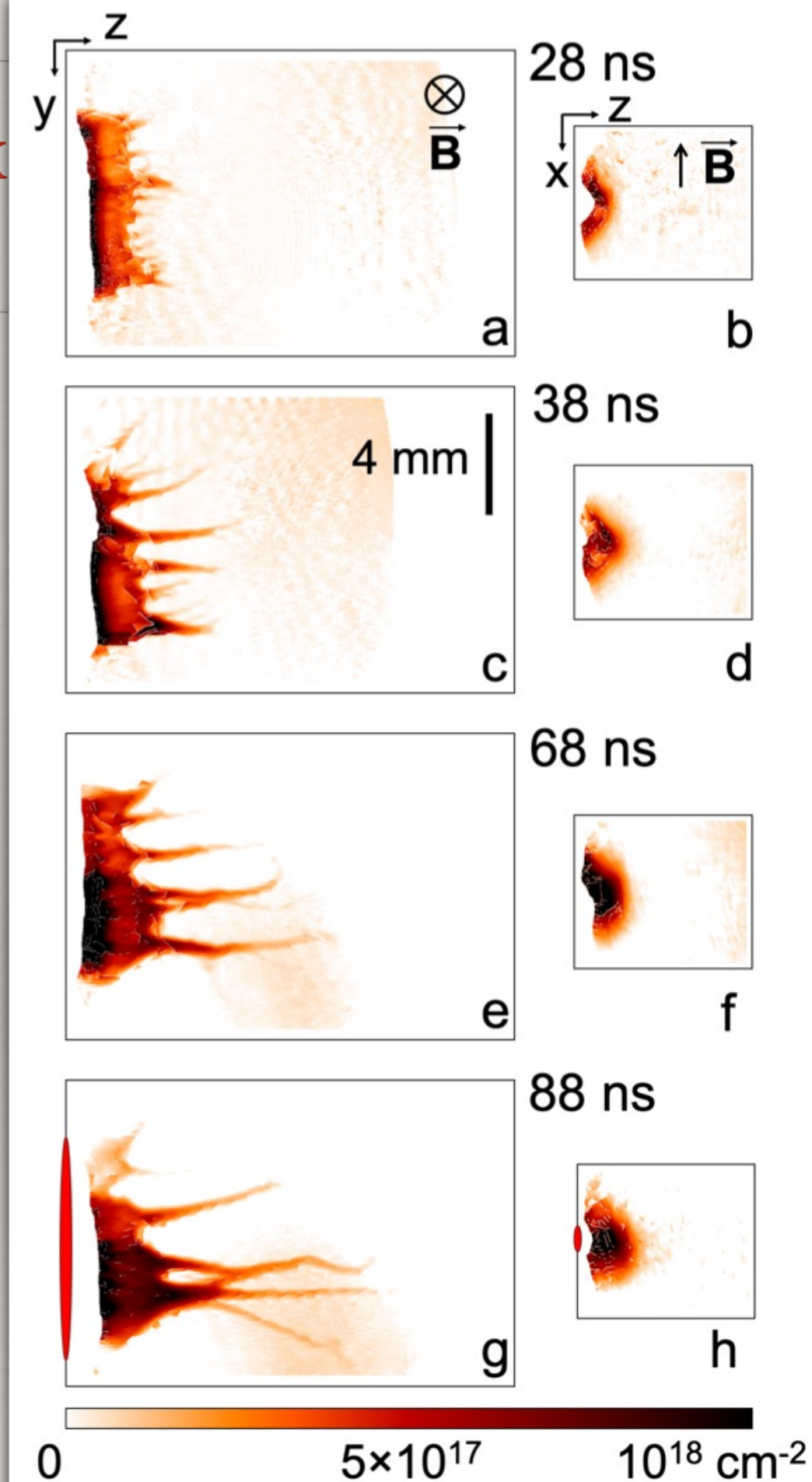
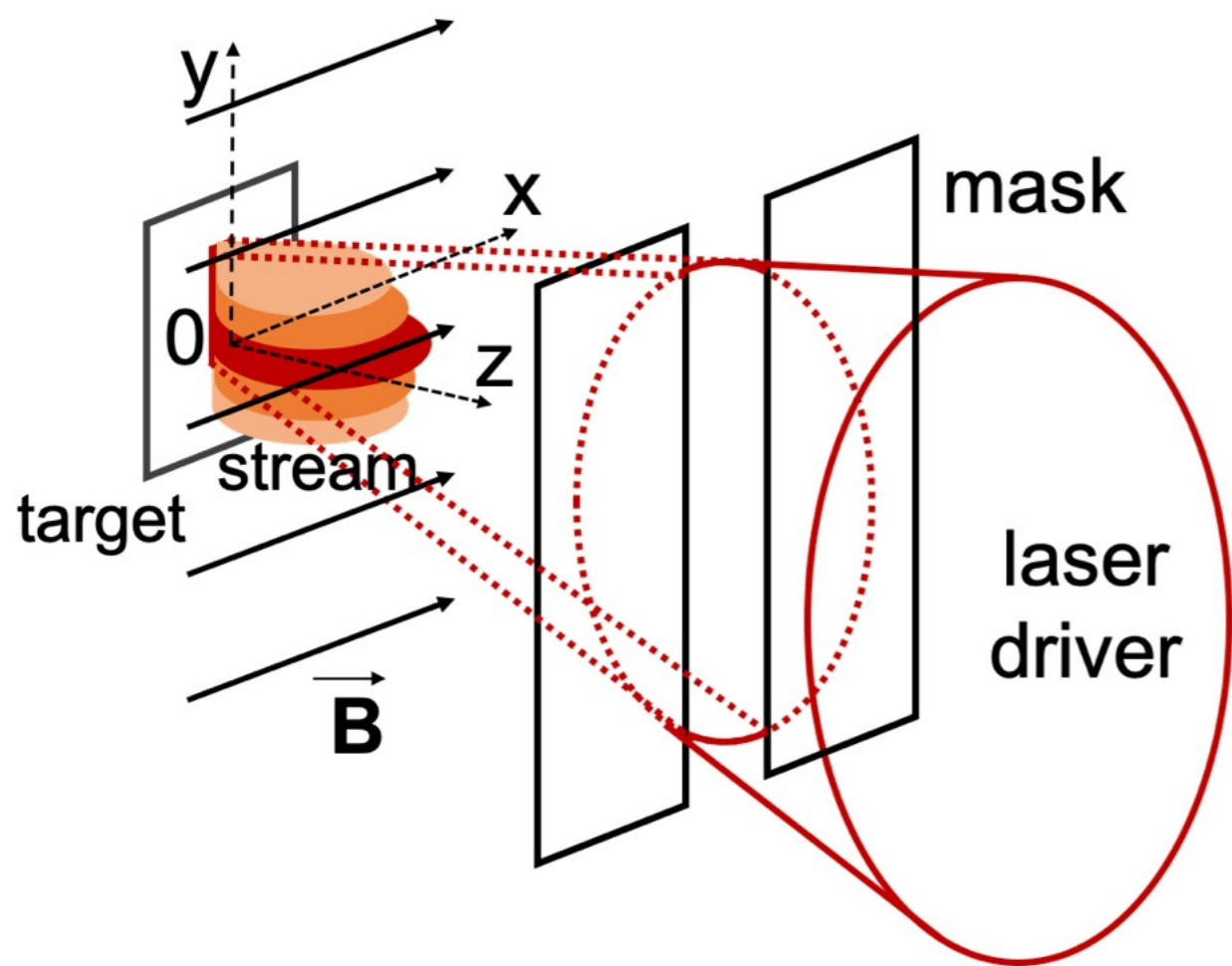
# Моделирование аккреционных процессов с помощью лазеров: пример

Лабораторное моделирование экваториальных аккреционных «язычков», вызванных неустойчивостью Рэля – Тейлора



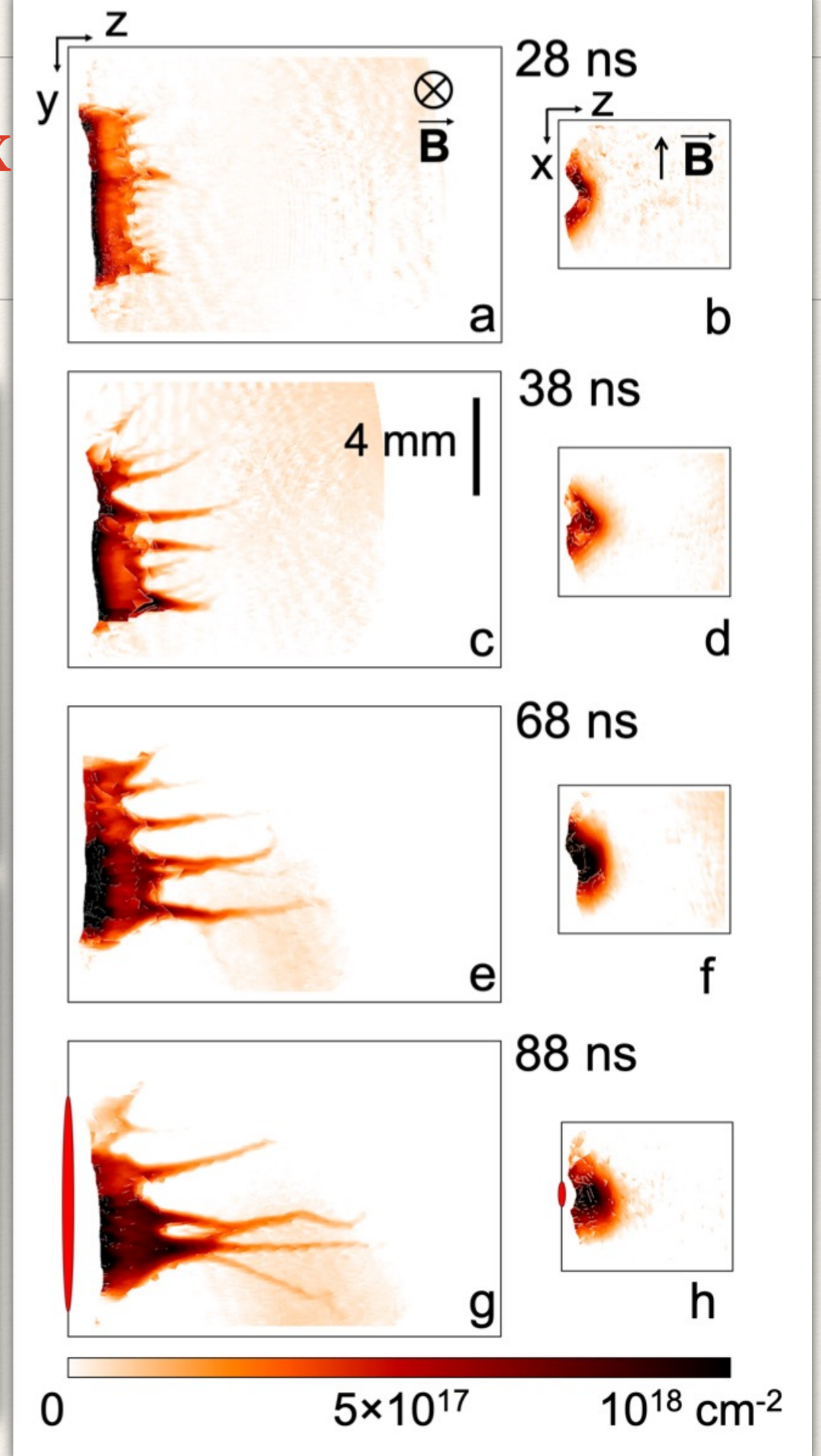
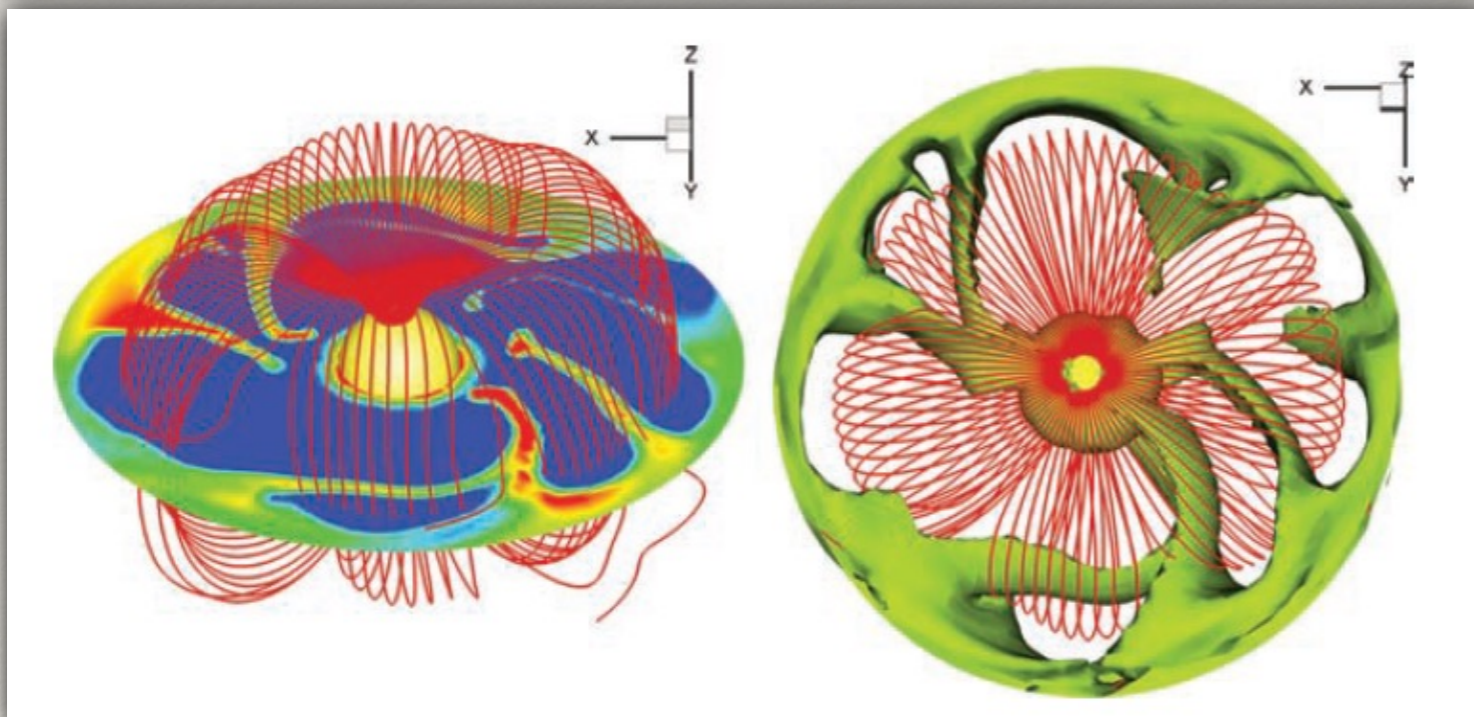
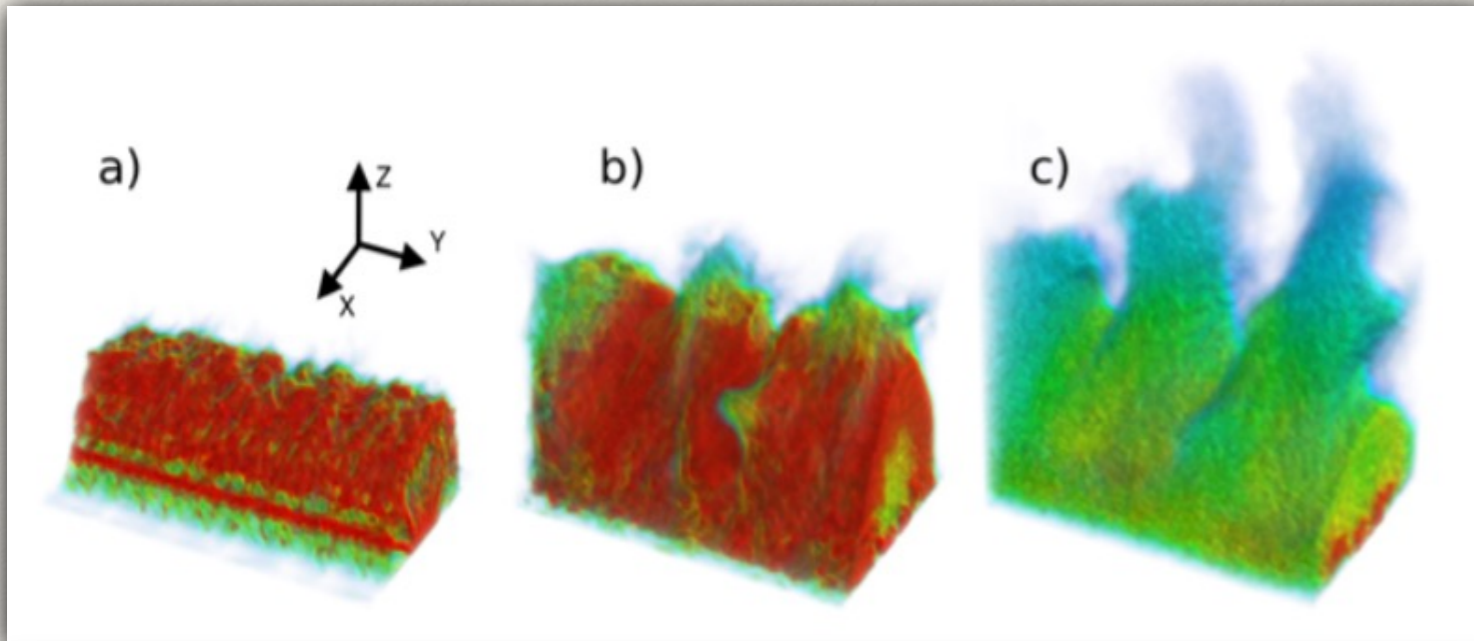
# Моделирование аккреционных процессов с помощью лазеров

Лабораторное моделирование экваториальных аккреционных «язычков», вызванных неустойчивостью Рэля – Тейлора

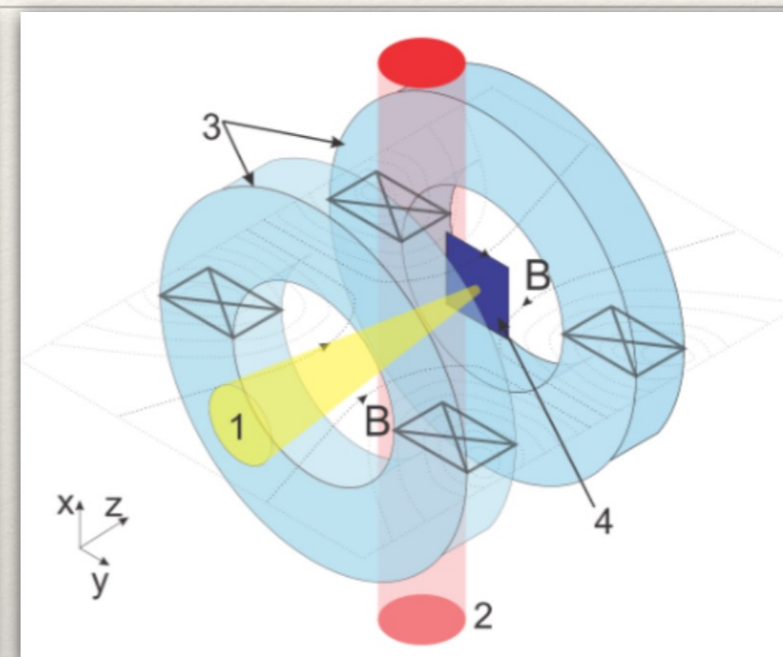
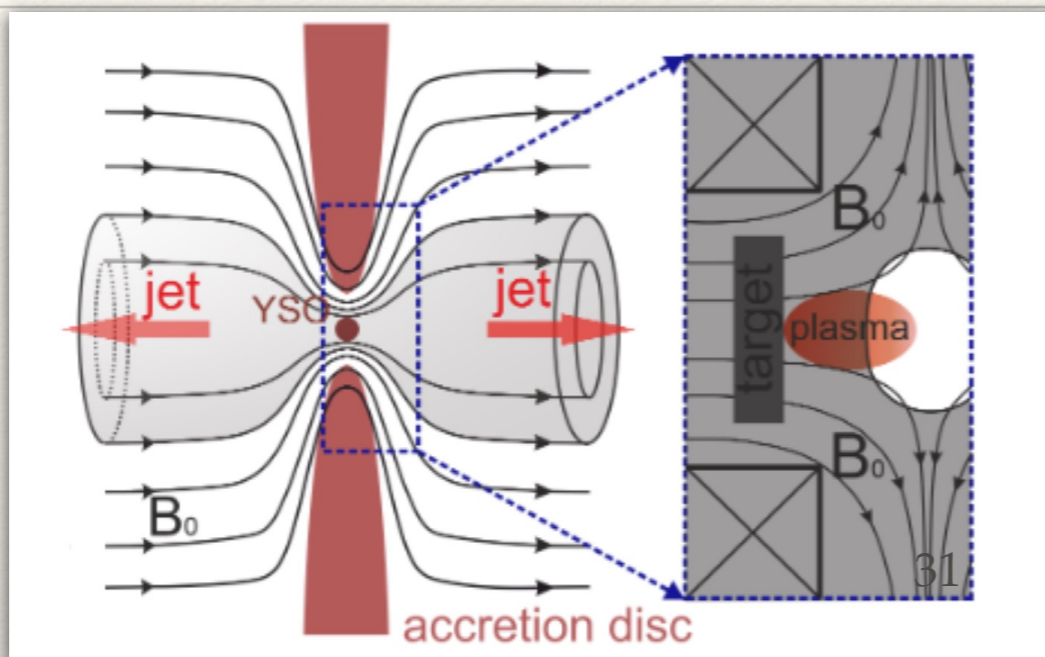


# Моделирование аккреционных процессов с помощью лазеров

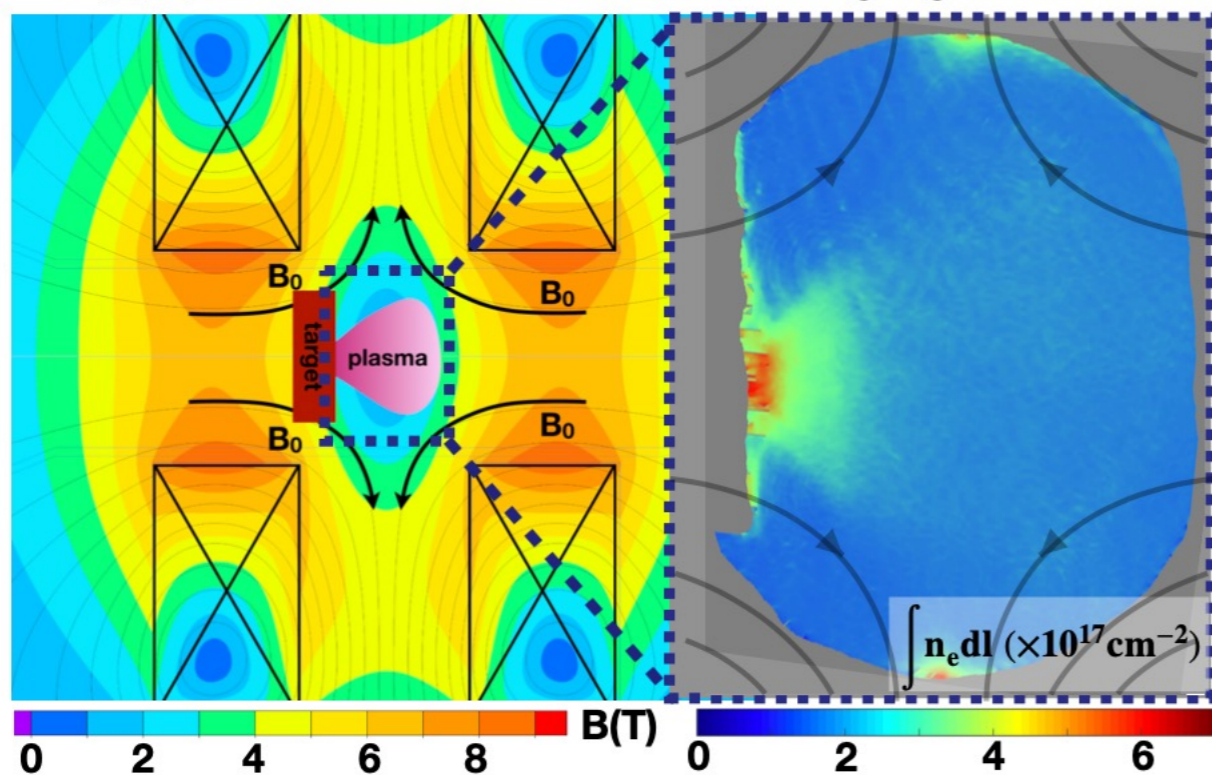
Лабораторное моделирование экваториальных



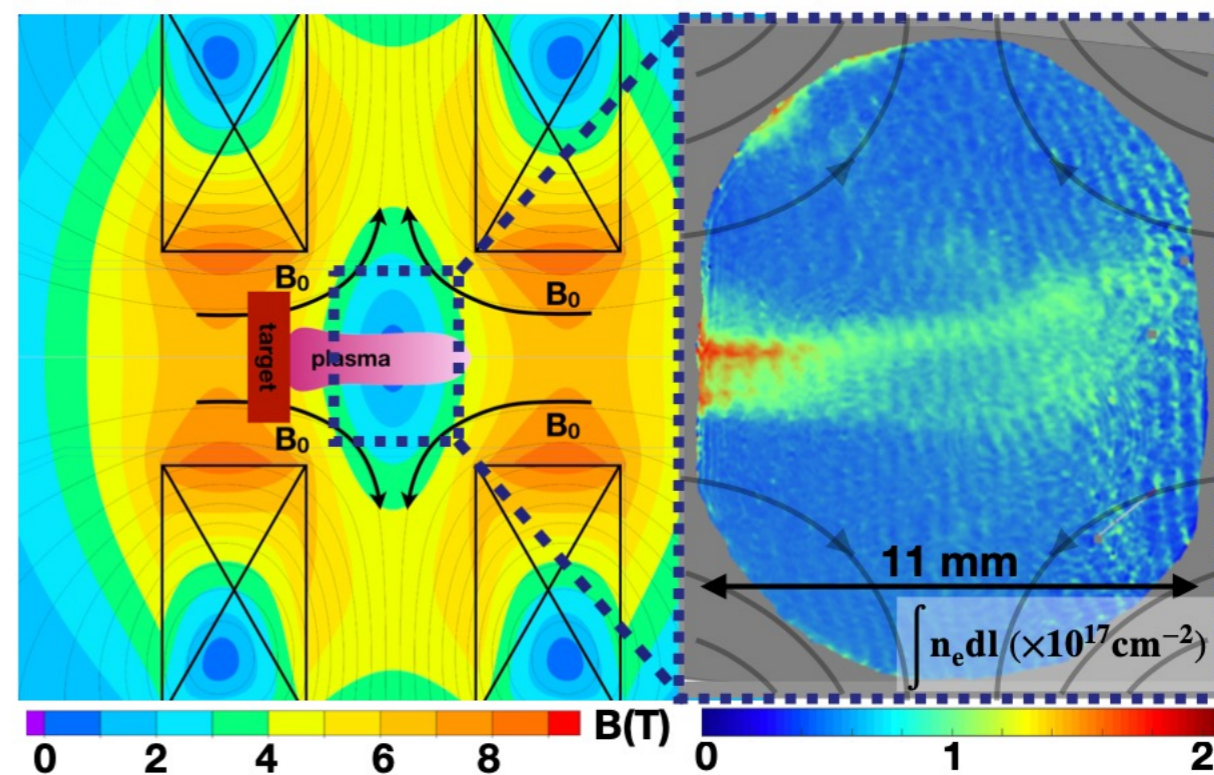
# Моделирование МГД процессов: особенности постановки экспериментов с сильным $B_0$



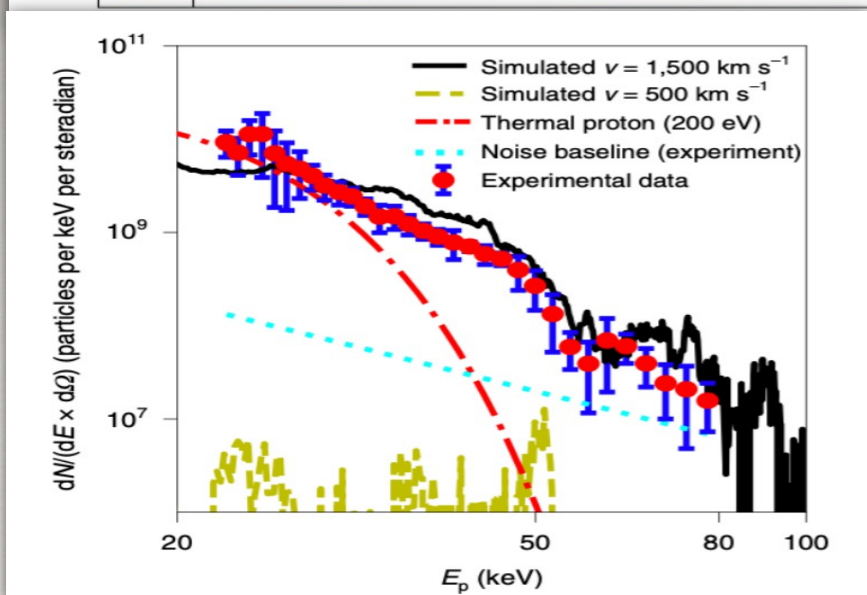
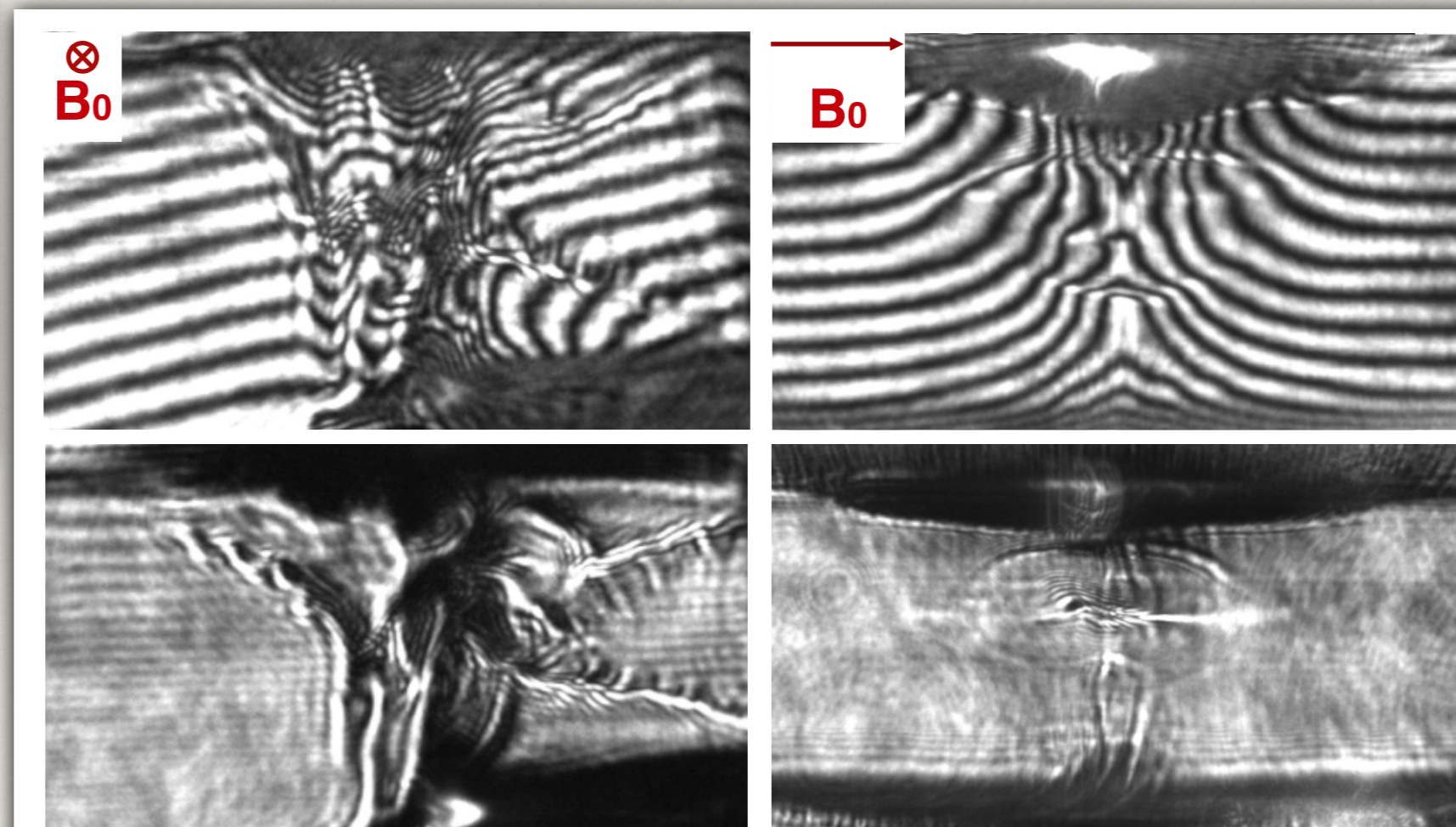
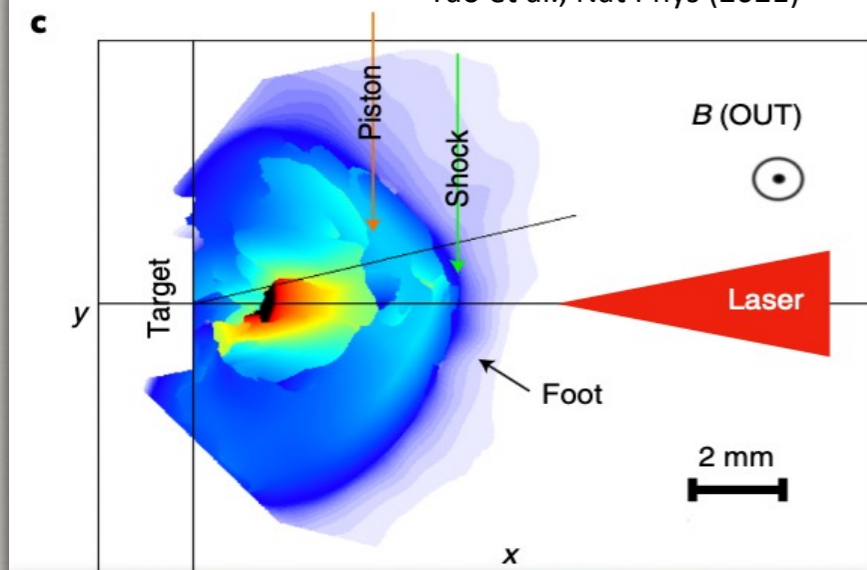
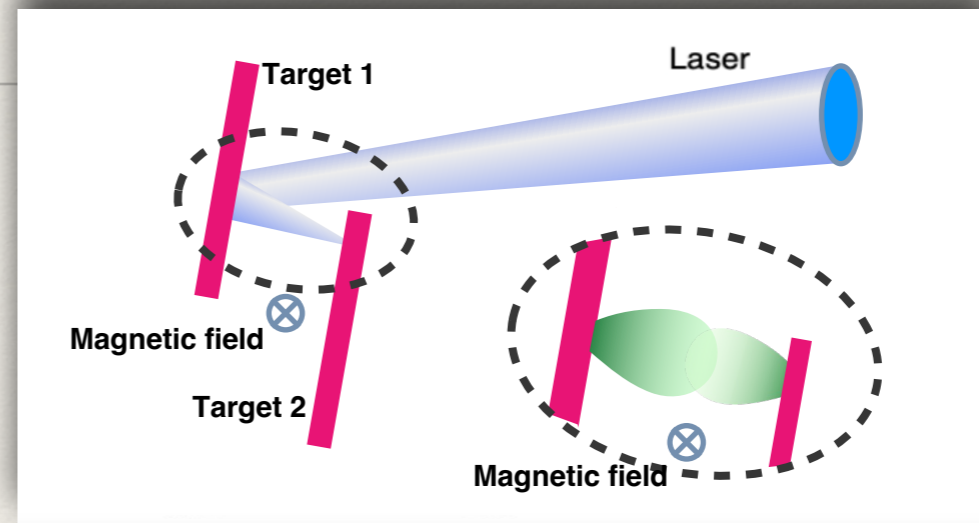
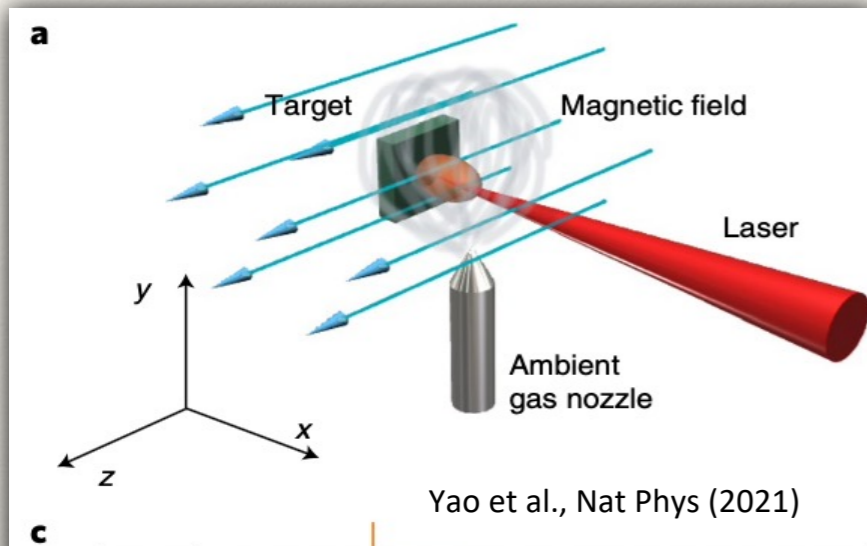
**(a):** jet source located in a diverging B-field



**(b):** jet source located in quasi-poloidal B-field



# Моделирование ударных волн с помощью лазеров: примеры





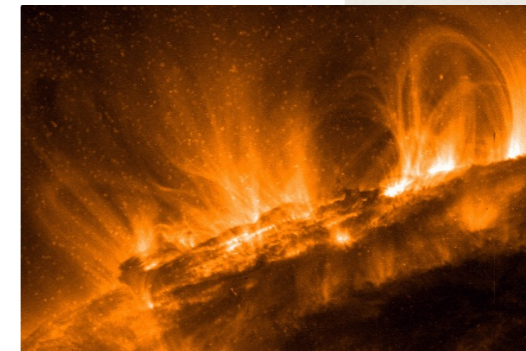
# Ускорение частиц и неравновесные плазменные процессы с использованием лазеров

In short, two types of lasers correspond (in general) to two types of plasmas

1. **Maximum energy** lasers  $\Leftrightarrow$  **long pulses** ( $\sim$ ns)

$\rightarrow$  “thermal” plasma,  
 $\sim$ at equilibrium,  
dense (compressed/solid/expanding)  
& hot (eV-keV)

$\updownarrow$   
high-velocity

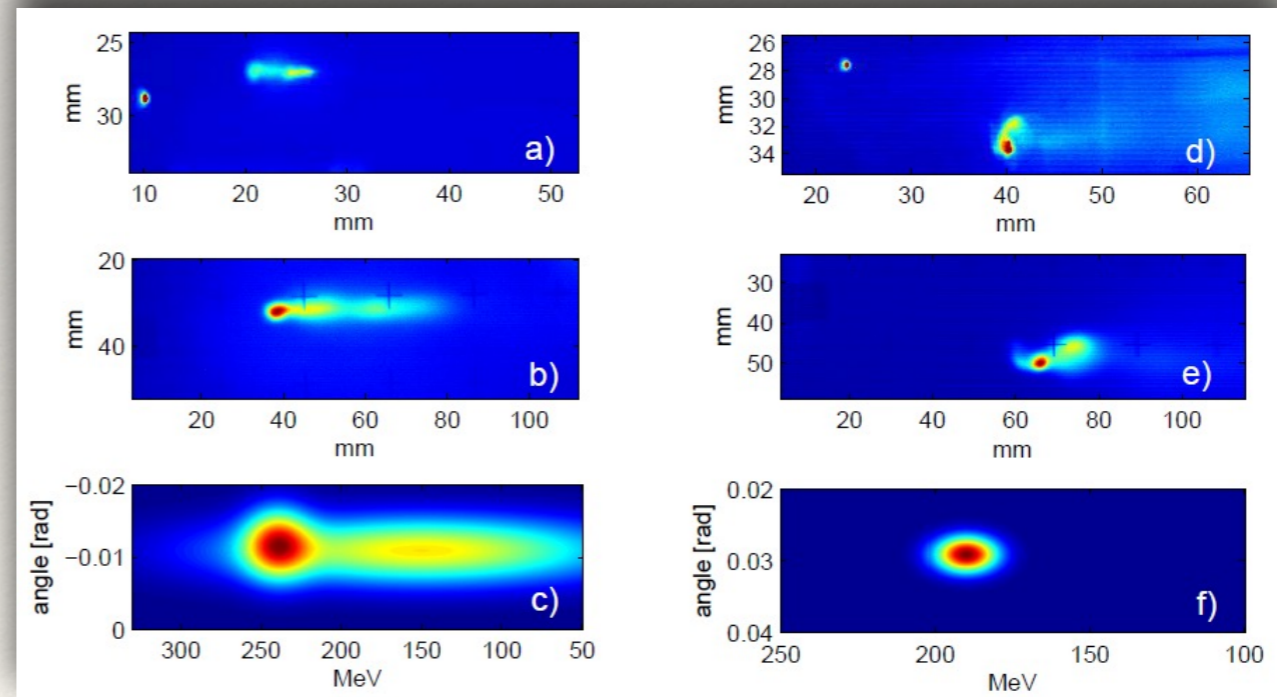
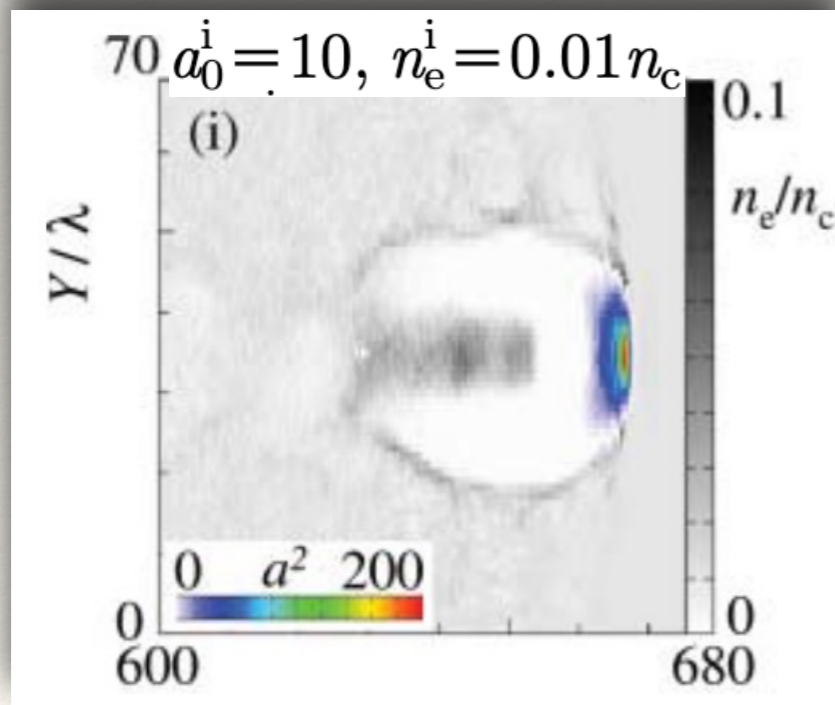
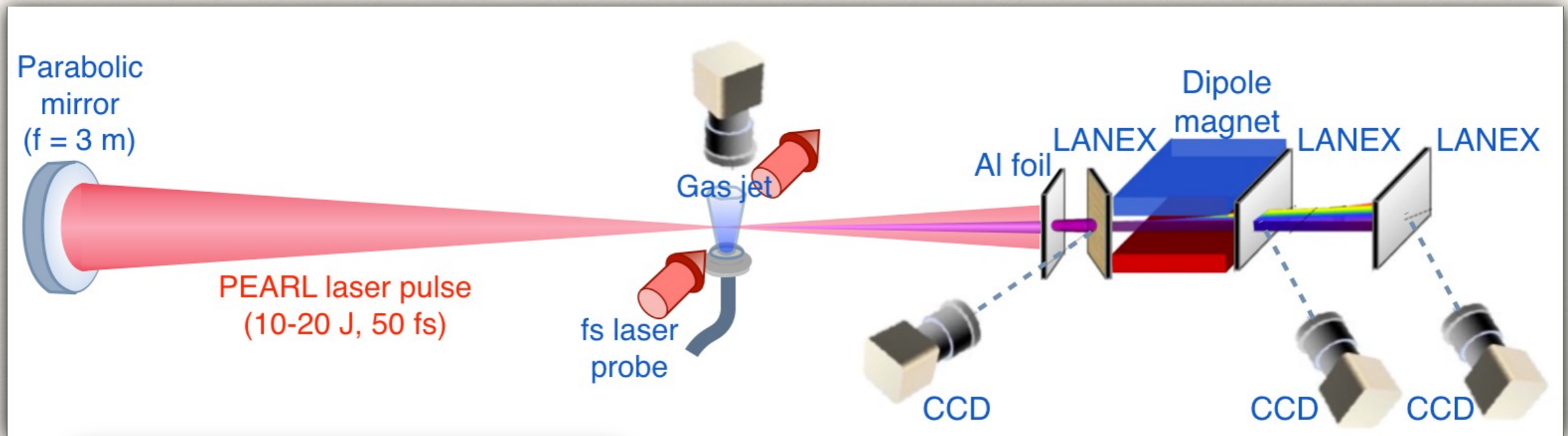


2. **Highest power** lasers  $\Leftrightarrow$  **short pulses** ( $\sim$ ps-fs)  $\Leftrightarrow$  maximum intensity  $\Leftrightarrow$  maximum E-field

$\rightarrow$  “kinetic plasma”  
strong out-of-equilibrium  
very high energy electrons



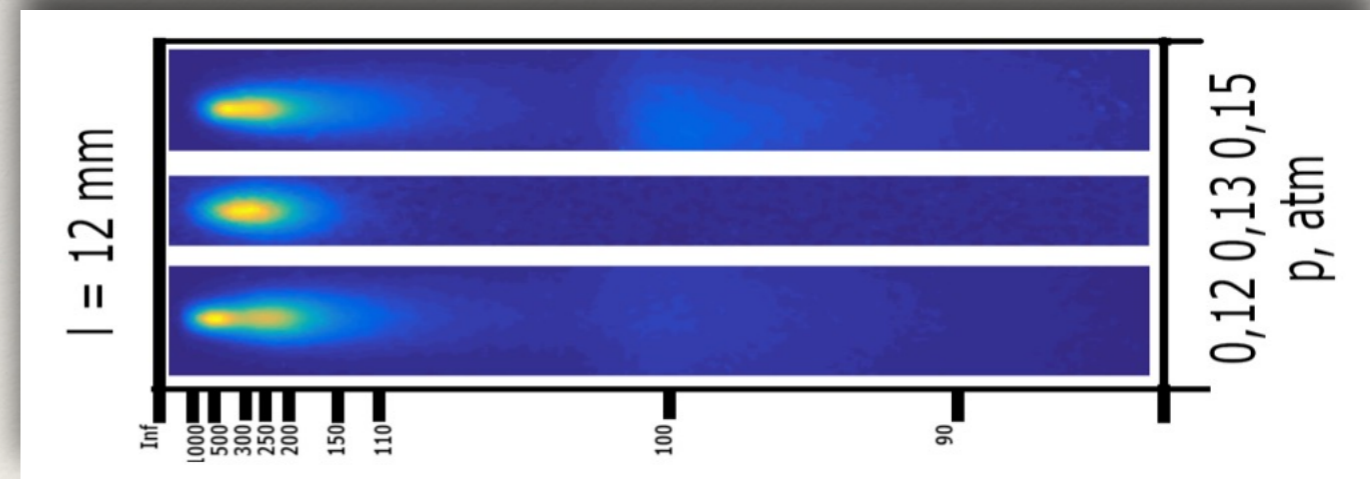
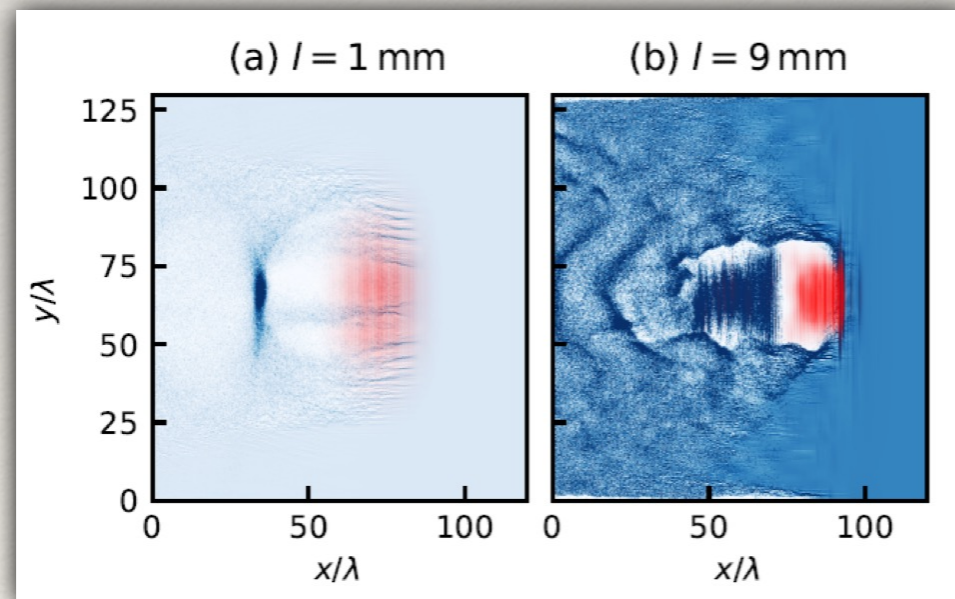
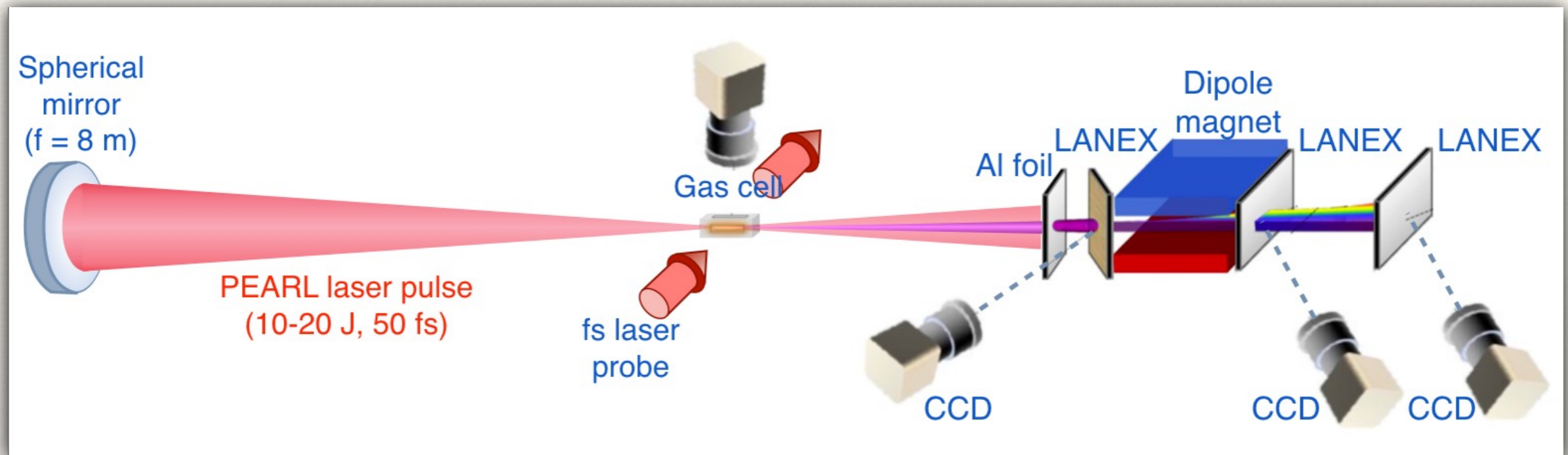
# Ускорение электронов с использованием лазеров



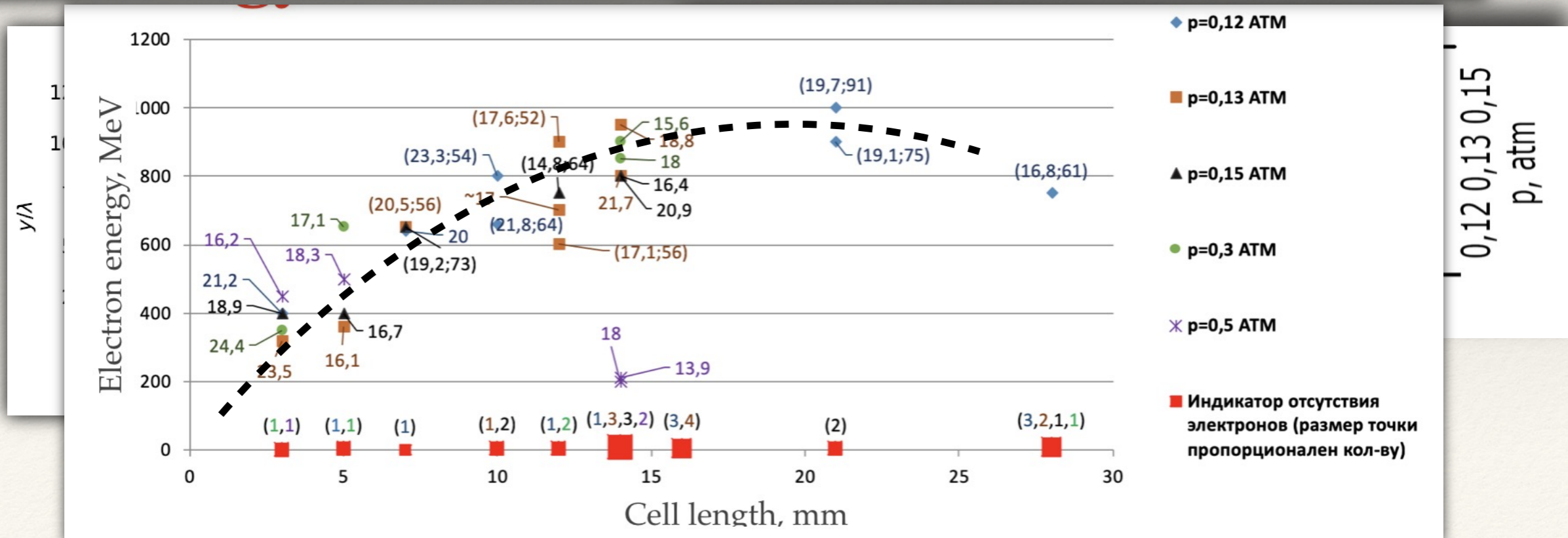
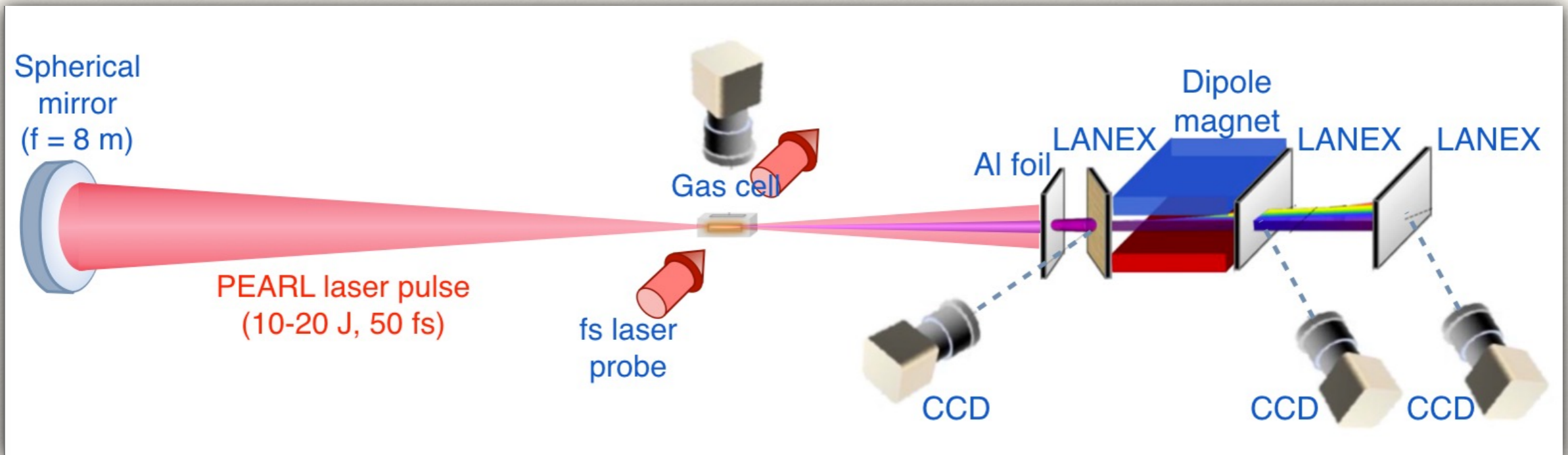
Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Burdonov K.F. et al. [Review of Scientific Instruments](#). 2011. T. 82. № 4. C. 043304.

Soloviev A.A., Burdonov K.F., Ginzburg V.N. et al. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A](#) 2011. T. 653. № 1. C. 35-41.

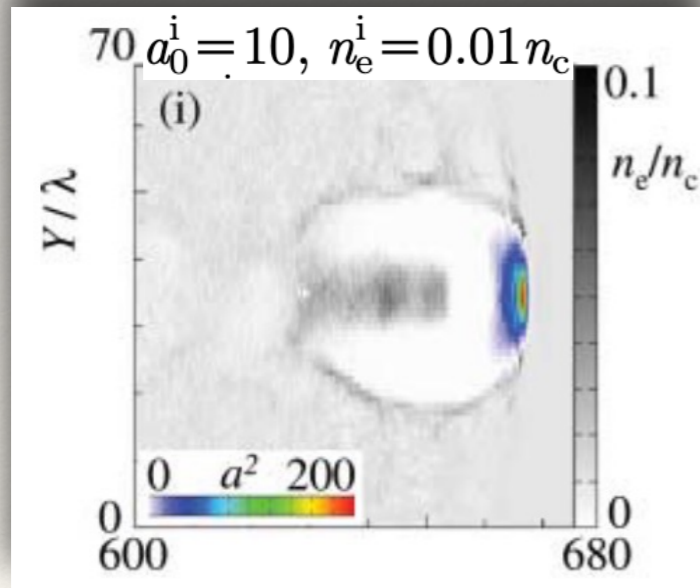
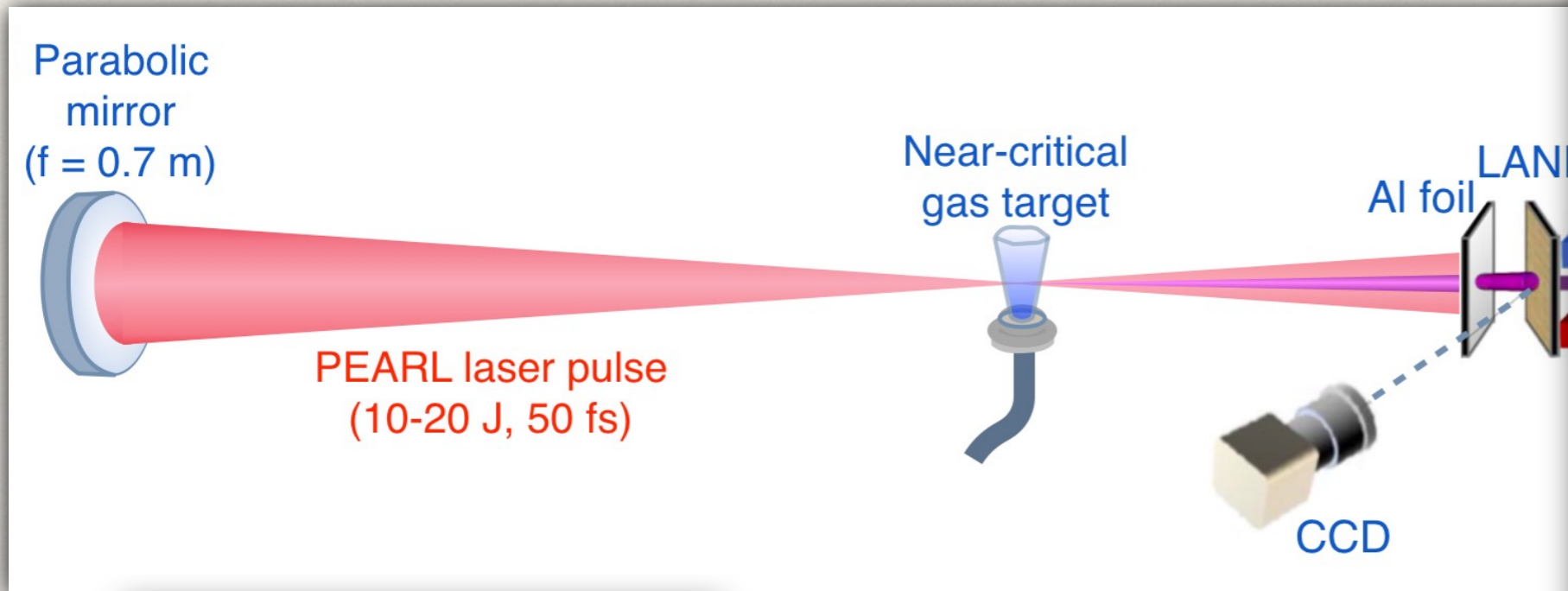
# Ускорение электронов с использованием лазеров



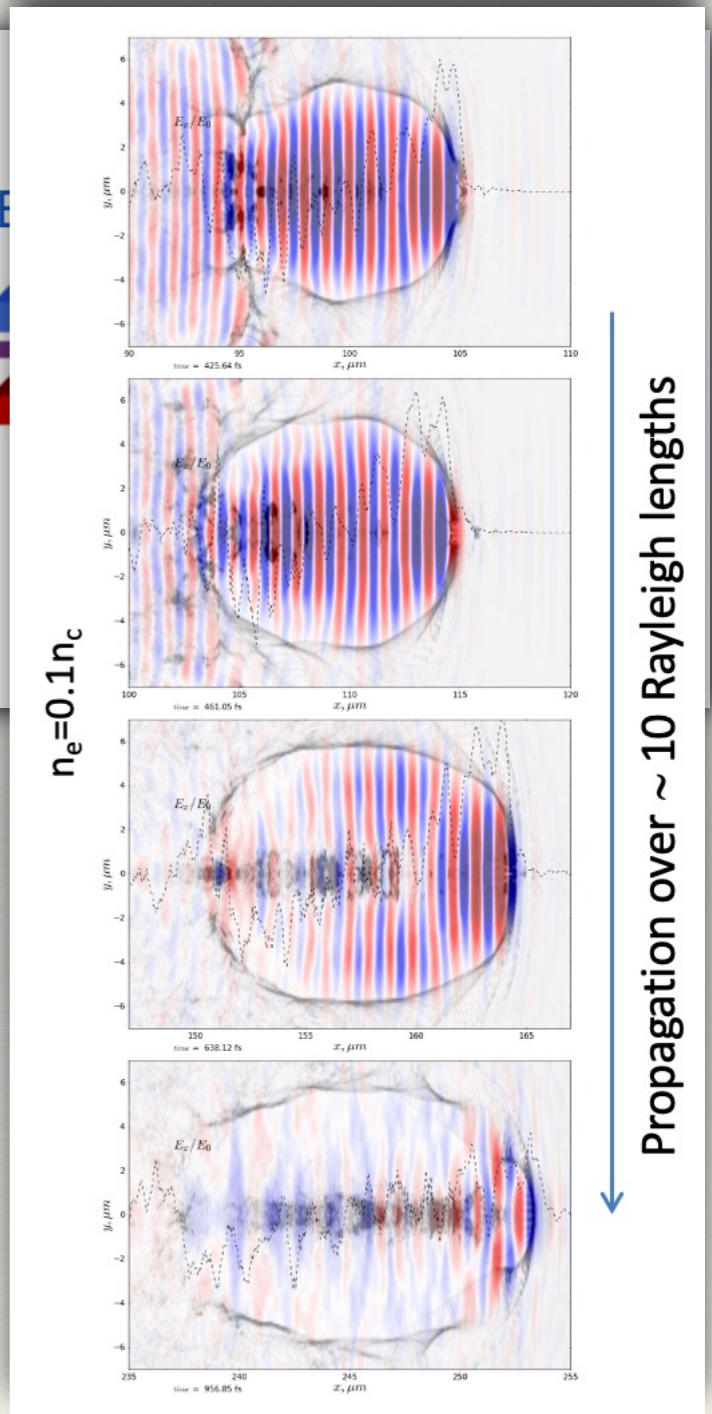
# Ускорение электронов с использованием лазеров



# Ускорение электронов с использованием лазеров



V. Yu. Bychenkov.  
 Nature Conference  
 Advances and Applications  
 in Plasma Physics,  
 SPb, Sept. 18-20, 2019

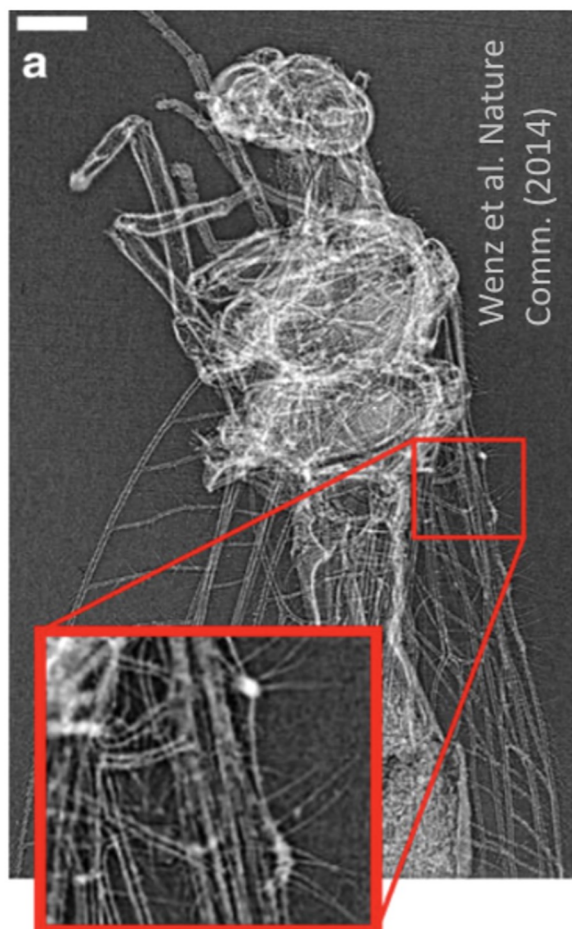


# Ускорение электронов с использованием лазеров

Значение для науки, для развития синхротронных (нейтронных) исследований



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



**Снижение затрат и повышение доступности визуализации объектов**

Развитие лазеров релятивистской интенсивности

Развитие лазерных методов ускорения заряженных частиц

Открытие стабильных лазерных СИ высокой пиковой яркости:

- основополагающий вклад участников;
- бум лазерных источников СИ в мире;
- пиковая яркость и жесткость - как у синхротронов 3-го поколения;
- востребованность ( $\mu$ СТ, фазоконтр. измерения, суб-пс временное разр.).

В рамках проекта:

- достижение рекордных (мульти-нКл) зарядов и пиковой яркости излучения;
- достижение рекордной жесткости излучения и расширение спектра приложений лазерных СИ

Лазерные нейтронные источники высокой пиковой яркости:

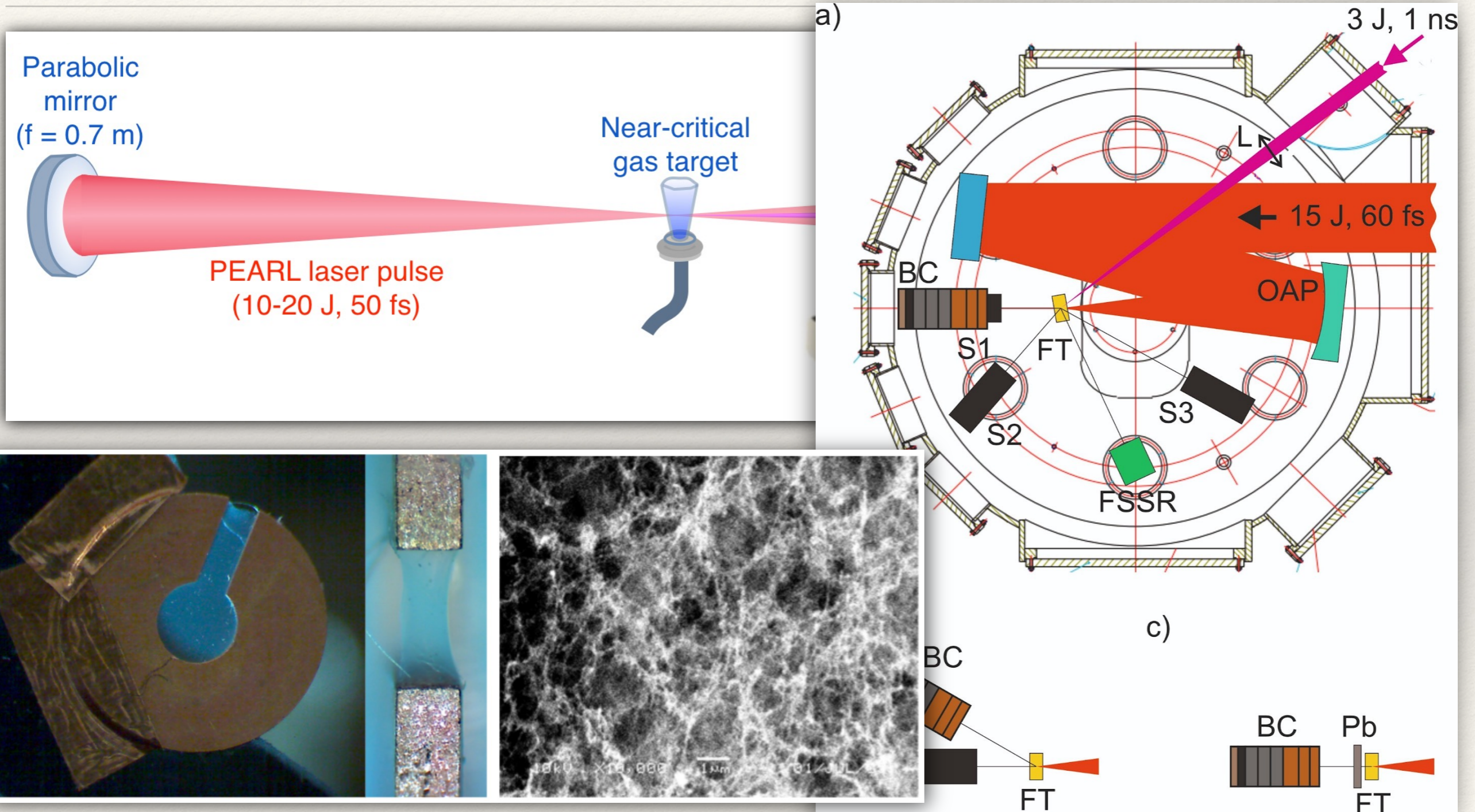
- основополагающий вклад участников;
- потенциал для задач нейтронной радиографии с высоким временным разрешением, ядерной флюоресценции, лабораторного моделирования синтеза тяжелых элементов.

В рамках проекта:

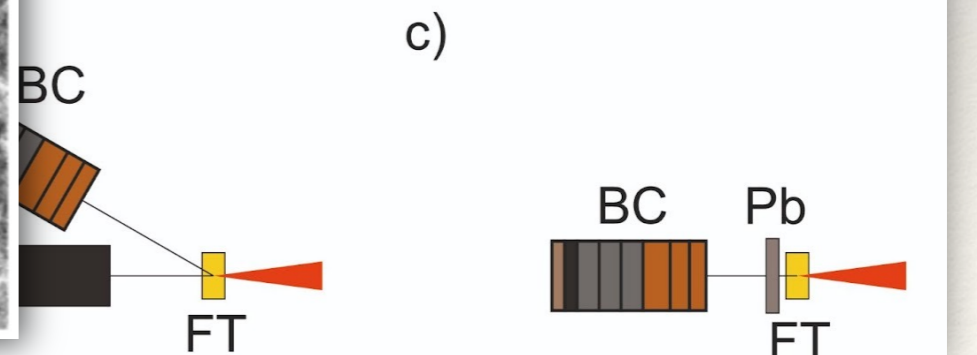
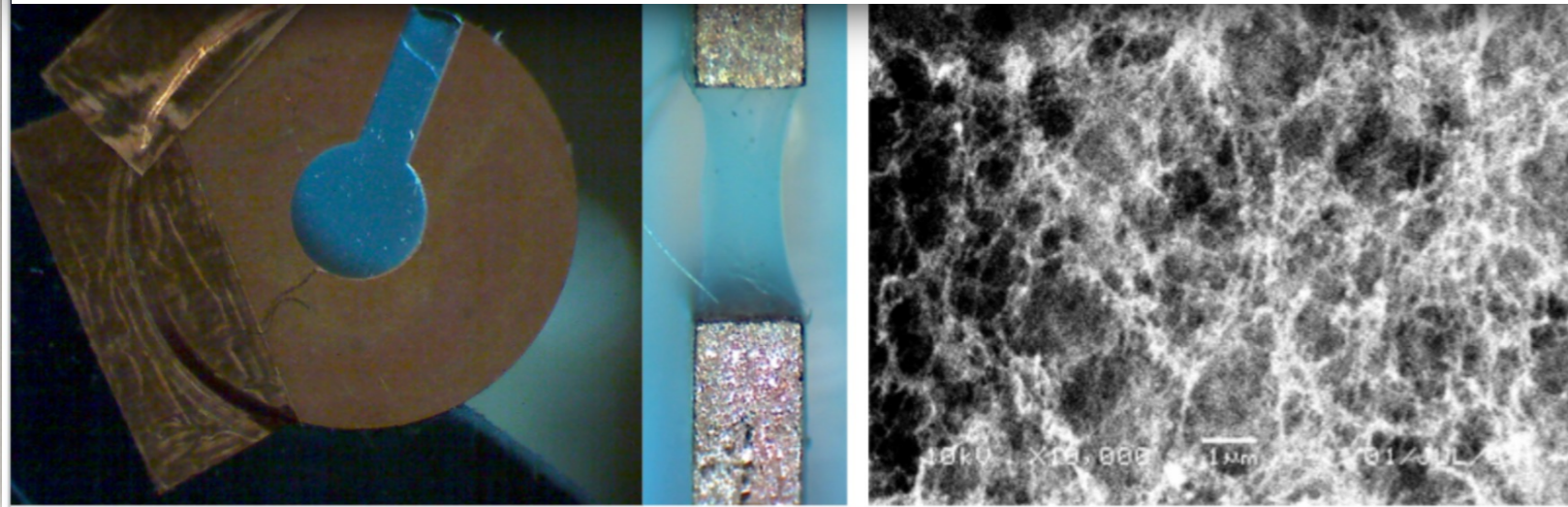
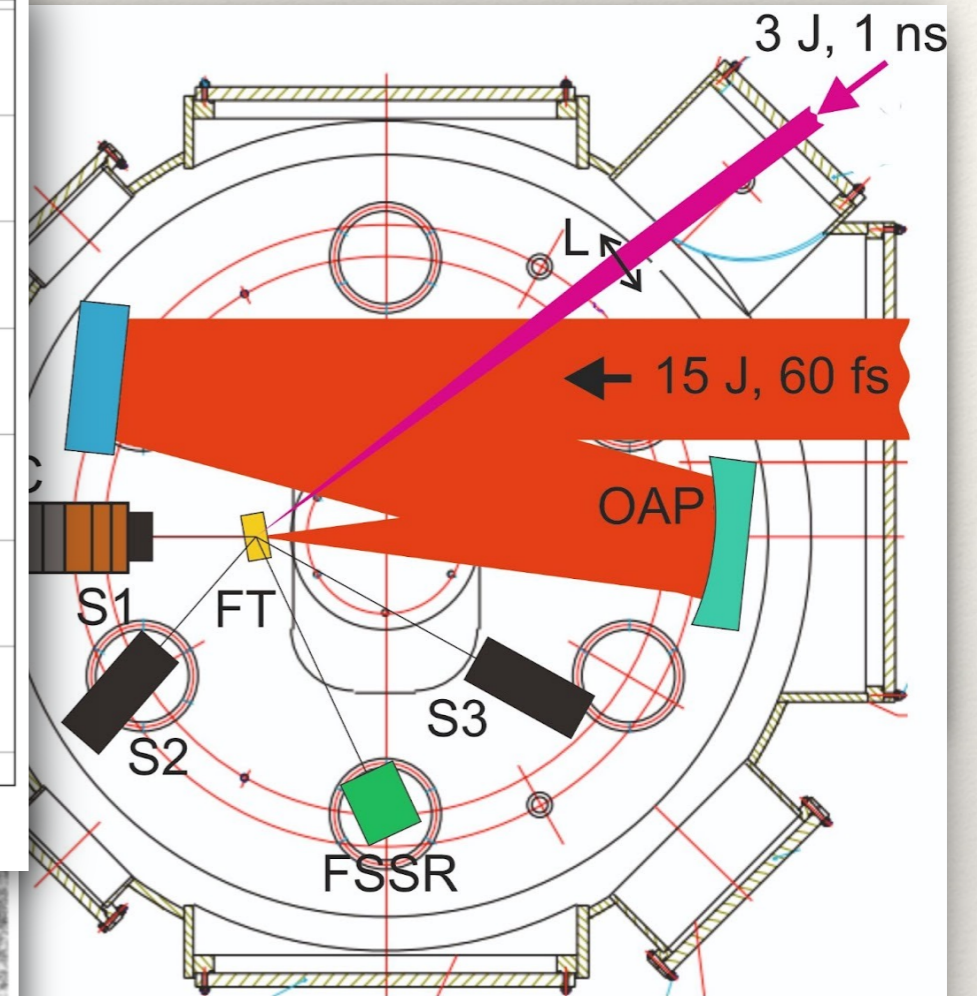
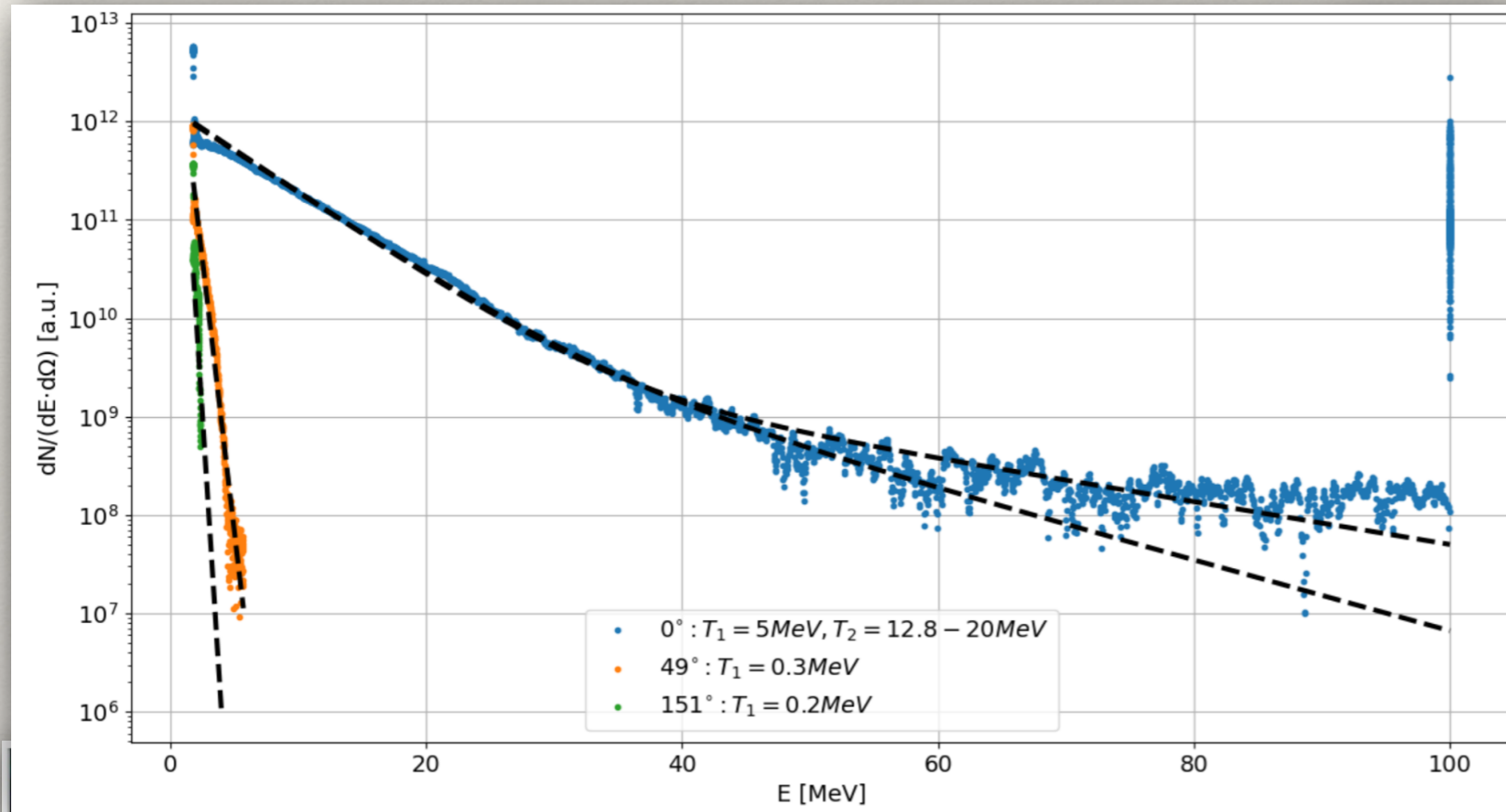
- найдены оптимальные схемы для максимизации потока нейтронов.

**Основной прорывной результат проекта: создание первого в РФ лазерного синхротронного источника**

# Ускорение электронов с использованием лазеров



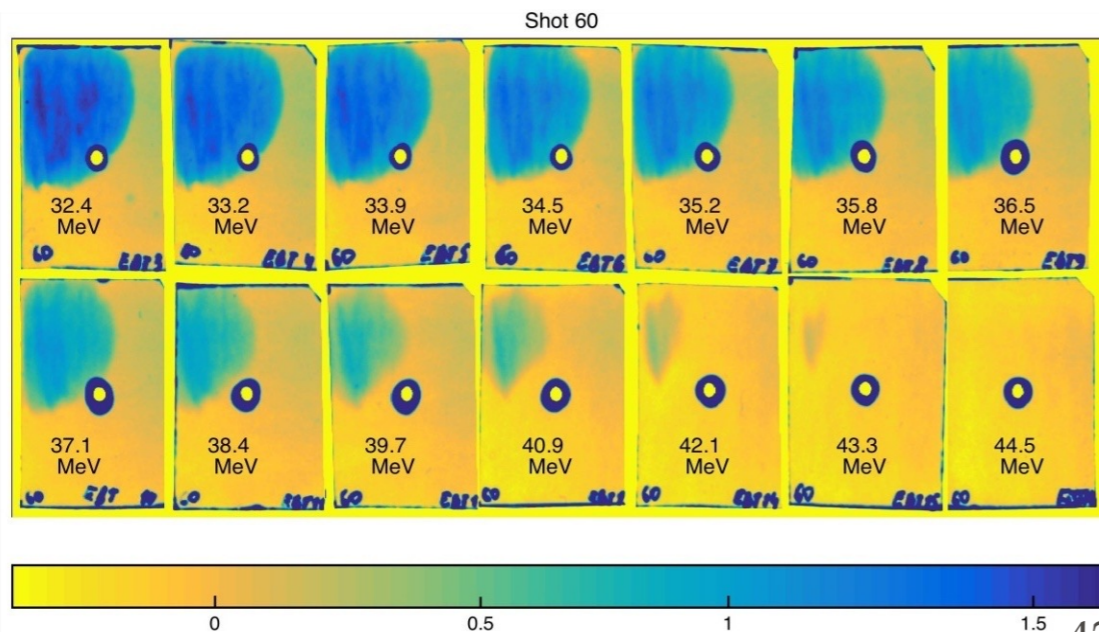
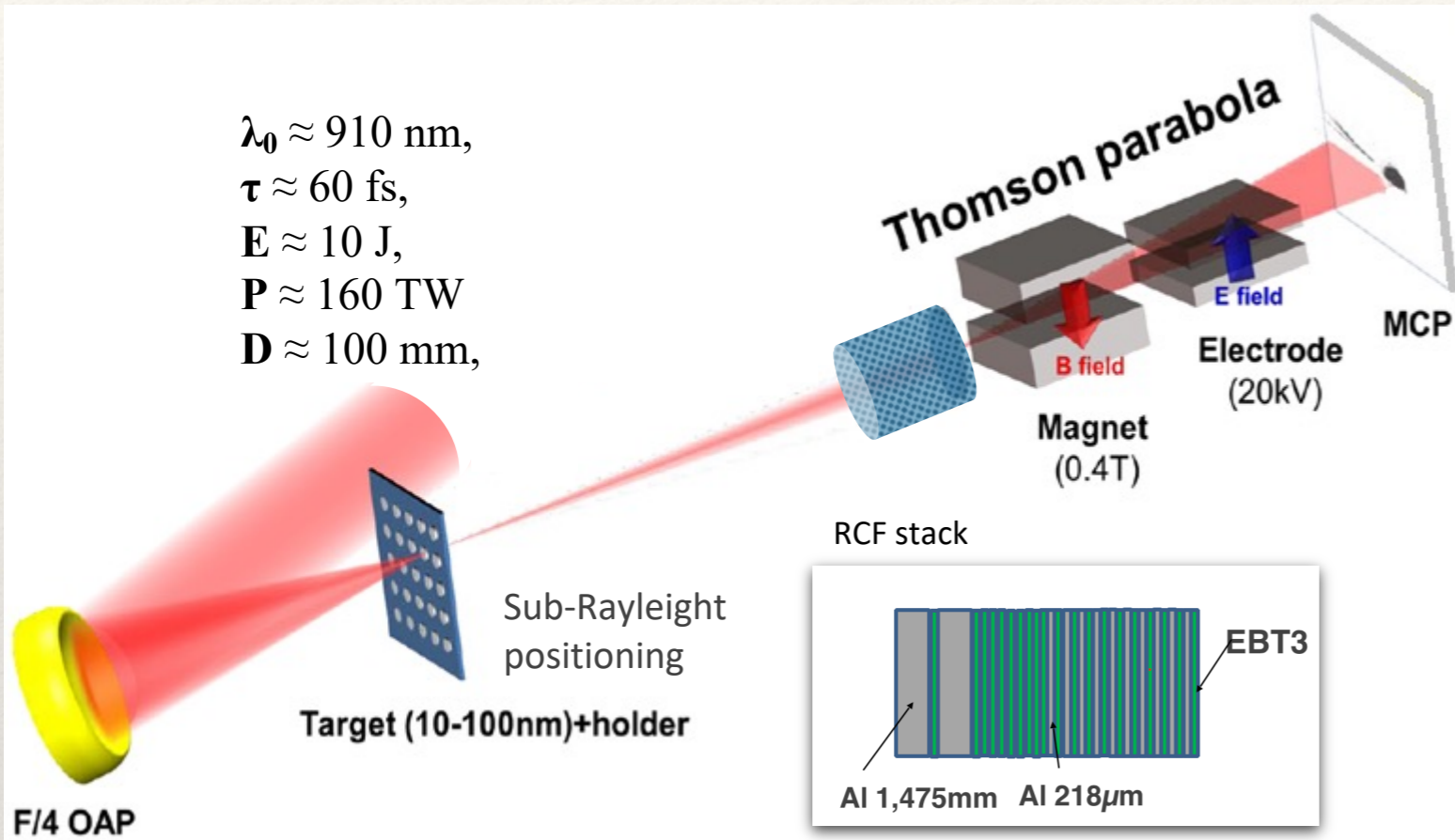
# Ускорение электронов с использованием лазеров



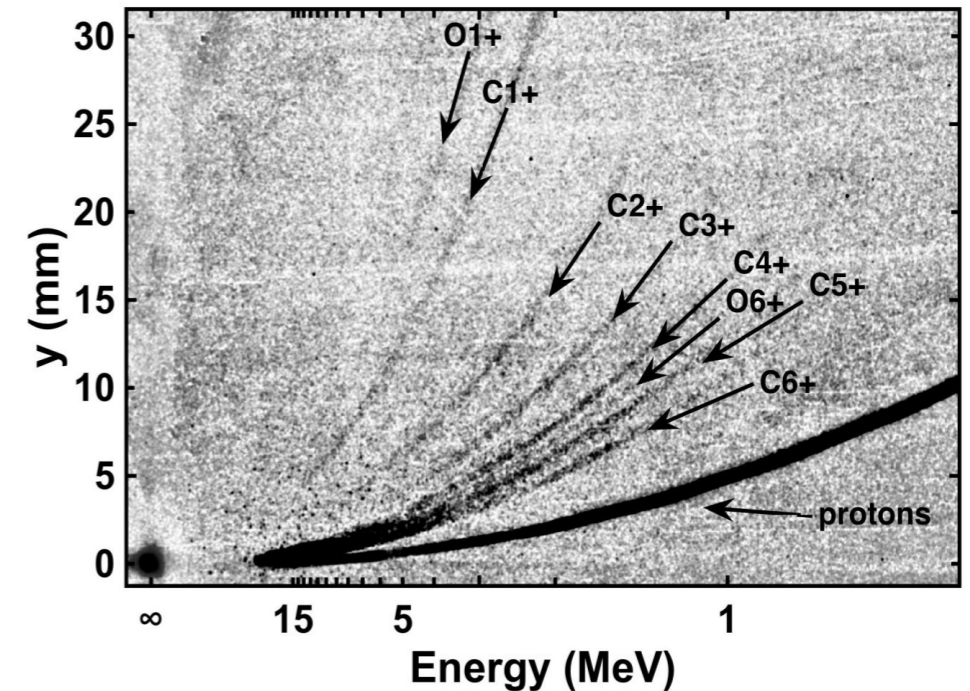
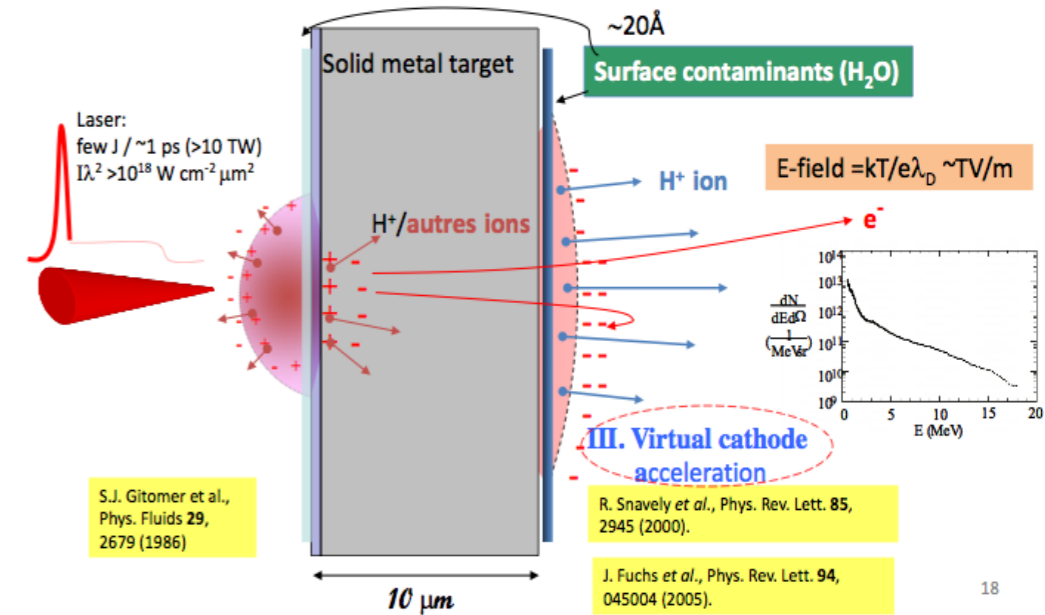


# Ускорение ионов с использованием лазеров

$\lambda_0 \approx 910 \text{ nm}$ ,  
 $\tau \approx 60 \text{ fs}$ ,  
 $E \approx 10 \text{ J}$ ,  
 $P \approx 160 \text{ TW}$ ,  
 $D \approx 100 \text{ mm}$ ,



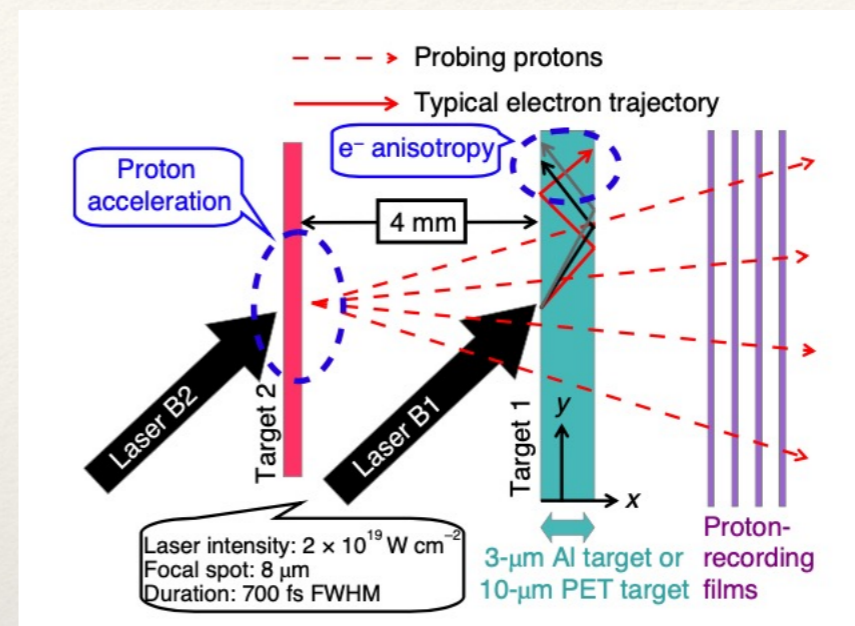
Ion/proton acceleration at target/vacuum interface  
 induced by laser-generated hot electrons in the present widely used  
 regime: *Target Normal Sheath Acceleration*



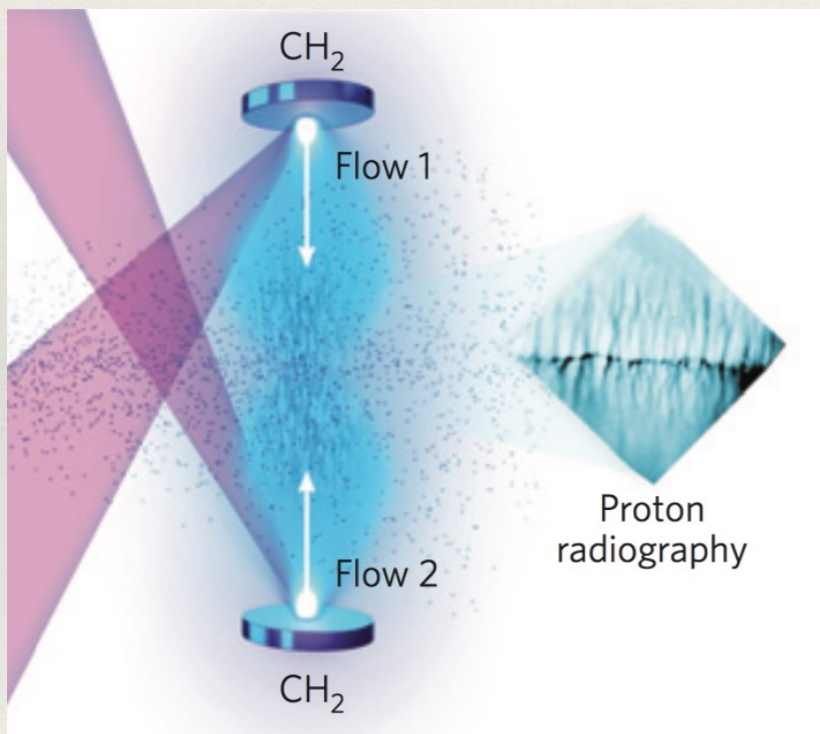
Soloviev A., Burdonov K., Chen S.N. et al. [Scientific Reports](#). 2017. T. 7. № 1. C. 12144.  
 Пикуз С.А., Скобелев И.Ю., Алхимова М.А. и др. Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 1-2. С. 15-20

# Лабораторное исследование вейбелевской неустойчивости с помощью лазеров

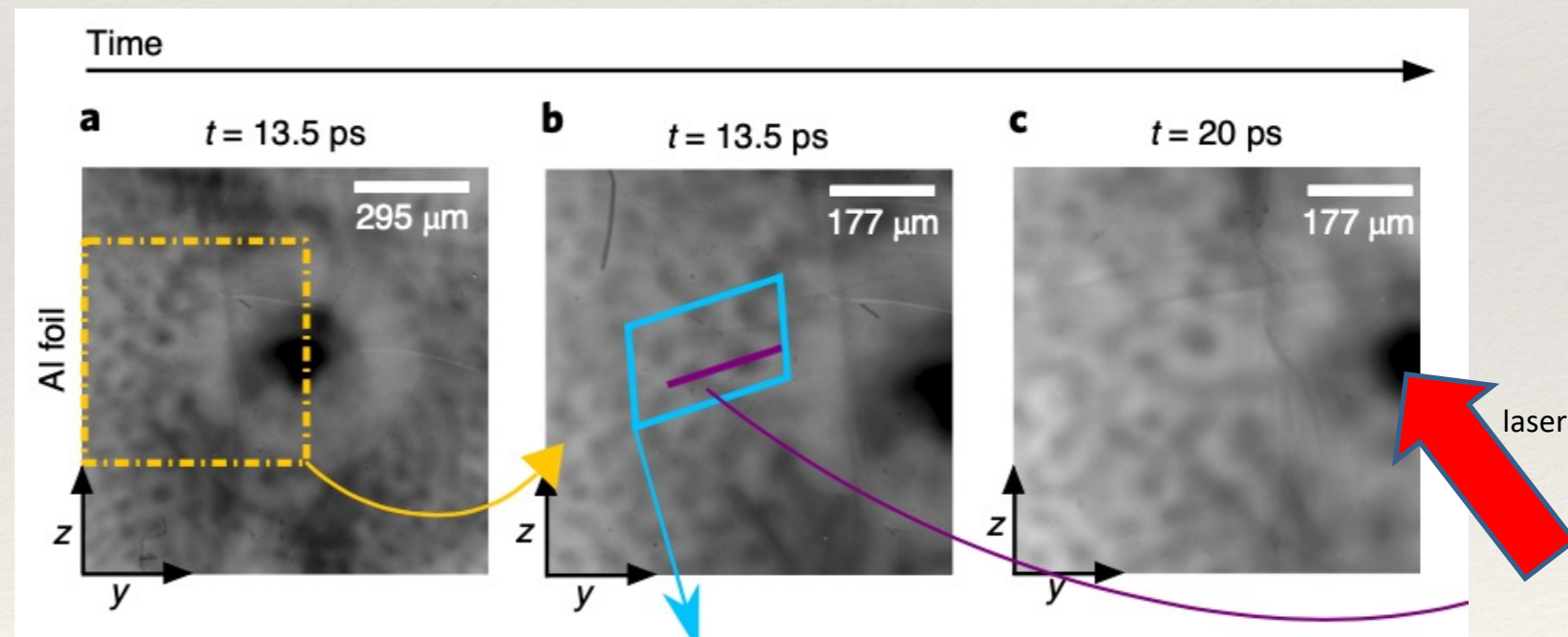
Great tool also for investigating **fundamental processes**, e.g. Weibel instability



$\mu\text{m}$  spatial resolution  
ps temporal resolution

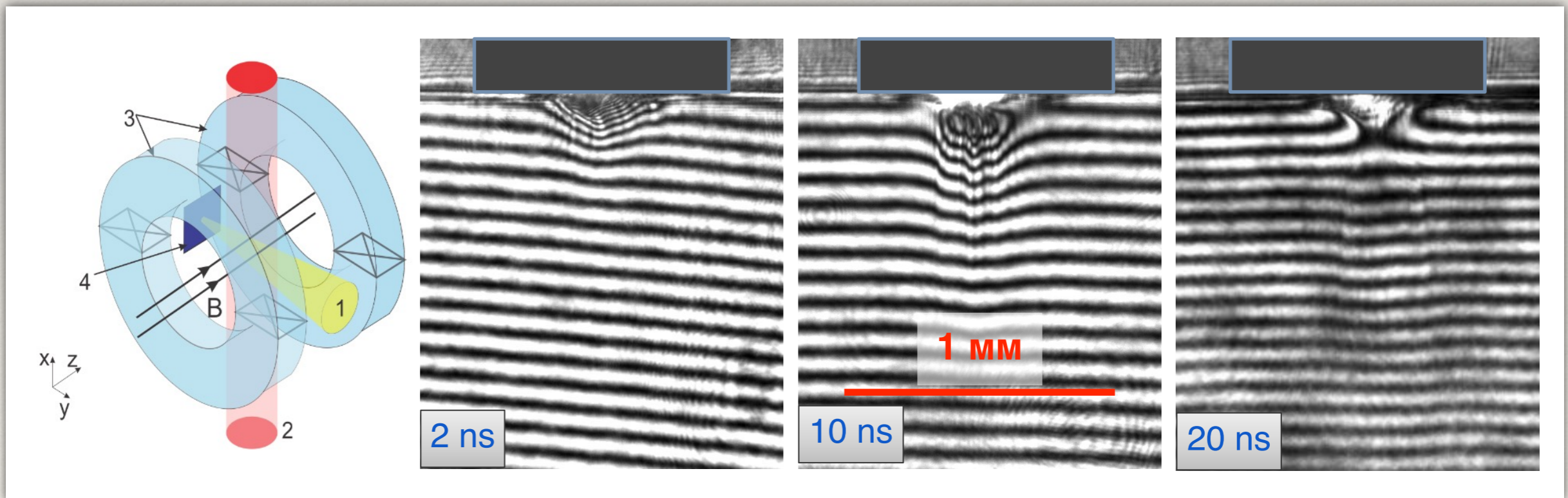
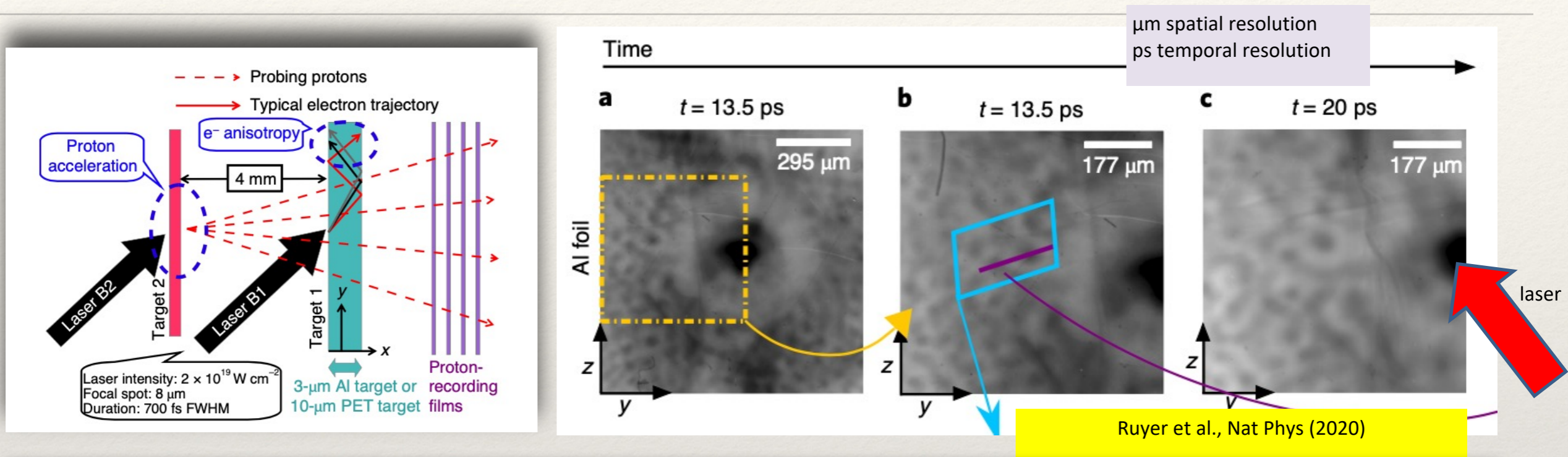


Huntington et al., Nat Phys (2015)

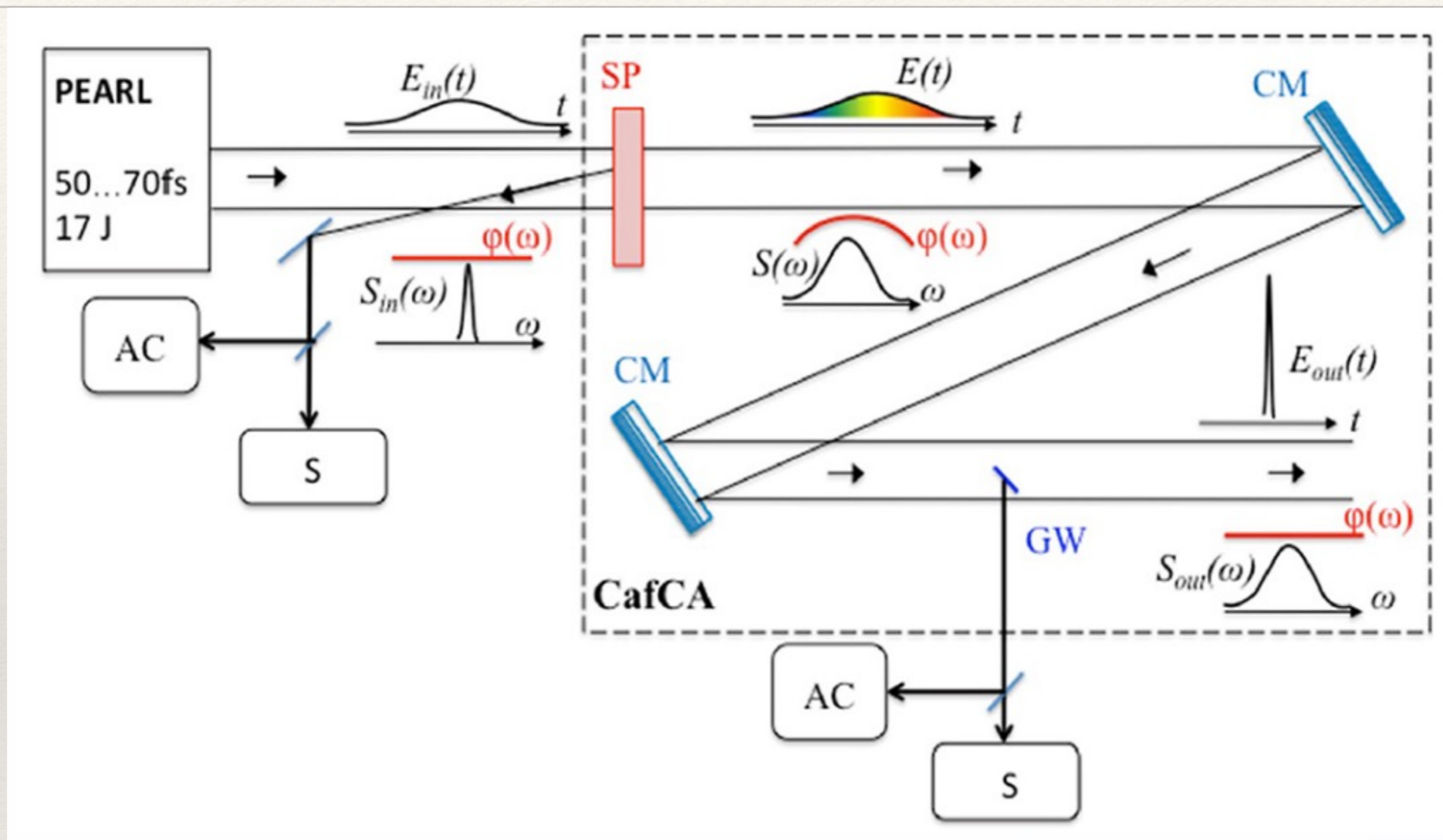


Ruyer et al., Nat Phys (2020)

# Лабораторное исследование вейбелевской неустойчивости с помощью лазеров



# Вместо заключения: посткомпрессия лазерного импульса



- длительность лазерного импульса сокращена с 60 до 10 фс
- пиковая мощность лазерного излучения превысила 1,5 ПВт
- пиковая интенсивность превышает 0,5 от теоретически достижимого предела

Что получится в экспериментах?