



Объединенный институт высоких температур РАН  
Заседание Ученого совета ОИВТ РАН - 30 мая 2016 г.

**Радиационные методы диагностики  
в экспериментах по лабораторной астрофизике  
с использованием сверхмощных лазерных  
импульсов**

**Тикуз Сергей Алексеевич  
лаборатория №1.2.5 НИЦ-1**

# Motivation

Investigations on HED:

$$E_{\text{ext}} > E_{\text{rest}}$$

$10^{11} \text{ J/m}^3 \sim E_{\text{rest}}$   
density energy of  $\text{H}_2$  molecule

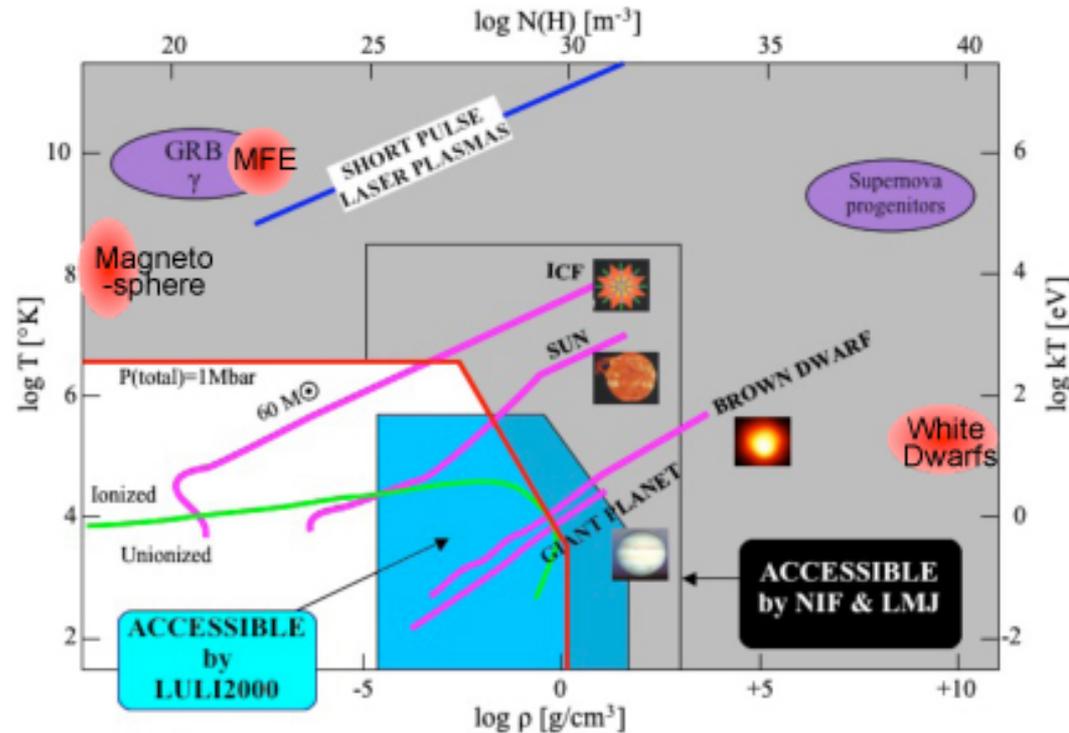


Large-volume, high-energy case:  
 $V \sim \text{mm}^3$ ,  $E_{\text{impact}} > 100 \text{ J}$   
*ICF, laboratory astrophysics,*  
*plasma (magneto)hydrodynamics,*  
*shock waves, wide-range EoS*

nanosecond, kJ – MJ lasers

High-intensity, micro-volume case:  
 $V \sim \text{tens } \mu\text{m}^3$ ,  $E_{\text{impact}} \sim \text{few to tens J}$   
*relativistic plasma,*  
*charge particle acceleration,*  
*radiation dominant plasma,*  
*high-harmonic generation, etc...*

pico/femtosecond, multiTW - PW lasers



# Outline

## Лабораторная астрофизика

- Мотивация, Принципы экспериментов, законы масштабирования

## Экспериментальные возможности

- **Сверхмощные лазеры** (PW, MJ, XFELs)

## Радиационная диагностика – Направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW

# Laboratory astrophysics - scalable plasma phenomena

Laboratory astrophysics – a tool to study astrophysical phenomena in a controllable conditions and at fast term evolution – using high power lasers

## Scalability conditions

Viscosity, heat transfer, radiation flow are negligible  $P_e \gg 1$   $Re \gg 1$   $\tau_{BB} \gg \tau_{hydro}$

HD validity  $\zeta \ll 1$

Euler similarity  $Eu_1 = Eu_2$

## A set of invariants to be preserved

$$I_1 = vt / r = St \quad \text{Strouhal number}$$

$$I_2 = \gamma \quad \text{polytropy coefficient}$$

$$I_3 = P_{th} t / \rho v r = Eu \times St = St / [\gamma M]^2$$

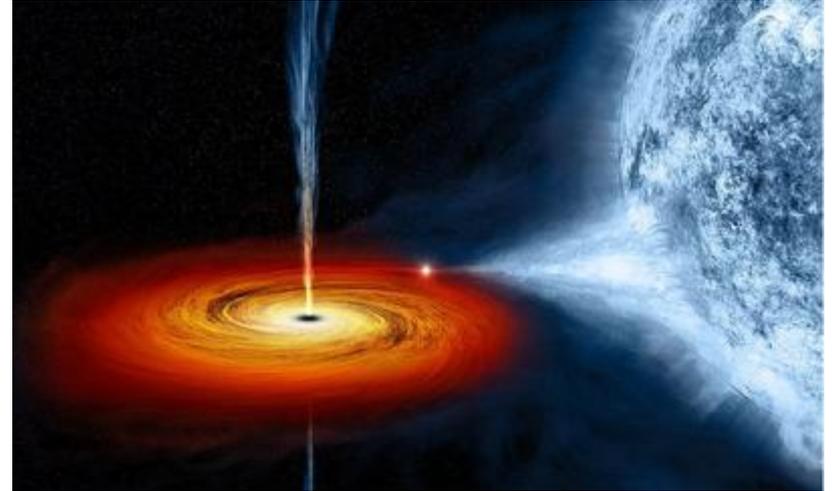
$$I_4 = \tilde{L} t / P_{th} \propto t / t_{\tilde{L}},$$

$$I_5 = M / [\rho r^{1+d}] \quad \text{mass conservation law}$$

$$I_9 = t F_R / (P_{th} r) = 1 / Bo$$

$$I_7 = P_R / (\rho v r) = Eu_R \times St$$

$$I_8 = E_R / P_{th} \propto 1 / R$$

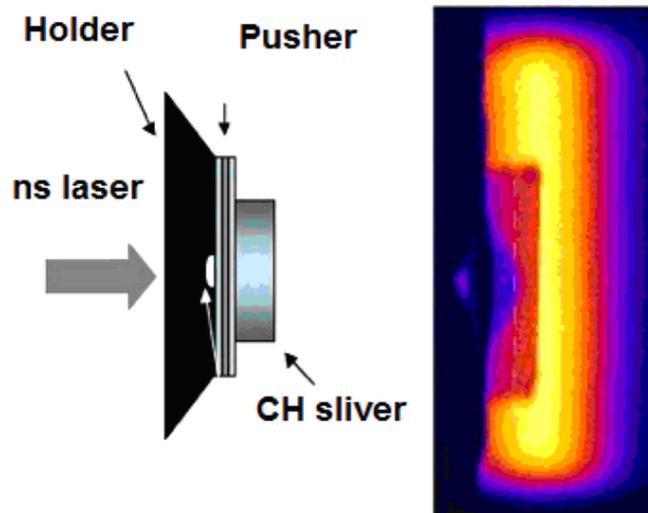
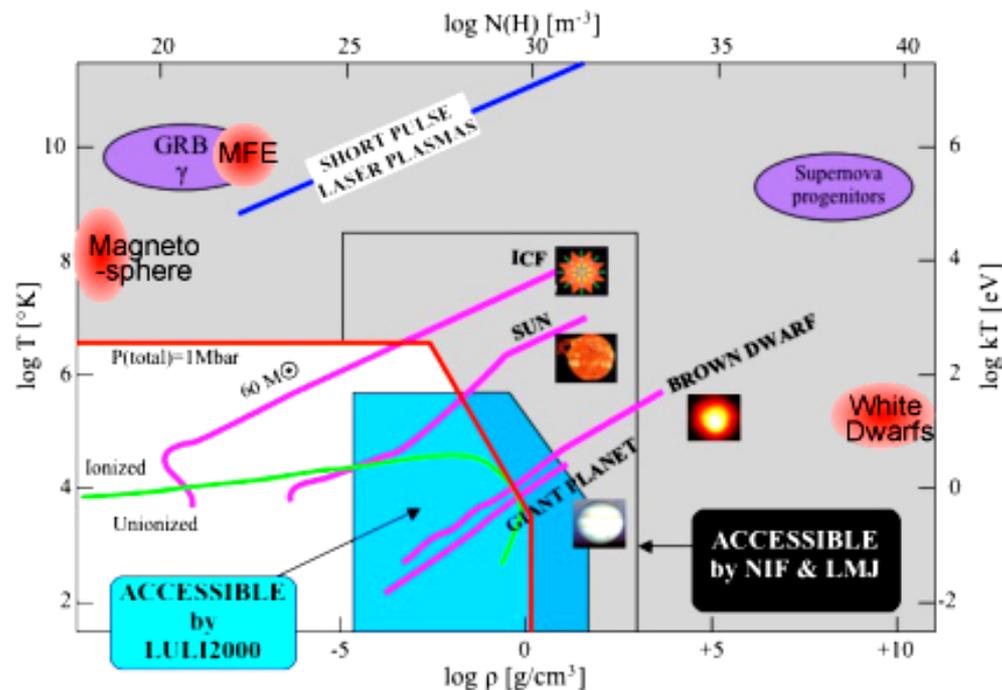


## Correspondence to Strouhal number invariant

Parameter	Astrophysical plasma	Laboratory plasma
V, km/s	~ 100 - 1000	up to 1000
r, mm	3E18	1
t, s	3E10	3E-8

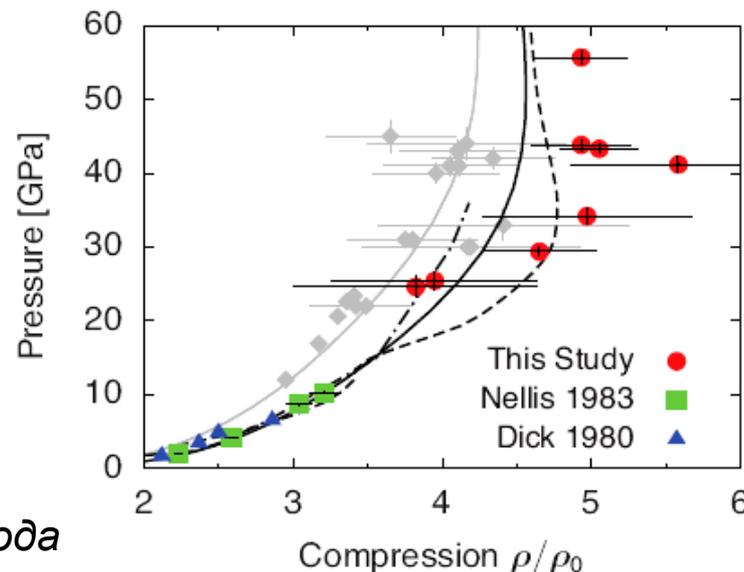
# Прямые измерения физических величин для HED

## Уравнения состояния вещества в экстремальных условиях



Ударная волна в СН

**Критерий проведения работ в области ФВПЭ:**  
 наличие источника энергии, обеспечивающего плотность внешнего энергетического воздействия выше плотности энергии связи в атоме водорода  $1e11$  Дж/м<sup>3</sup>.  
 (для импульса 1 Дж– объем не более 0.1 мм<sup>3</sup>)



Ударная адиабата водорода

# Верификация существующих моделей - нуклеосинтез

## Процессы нуклеосинтеза изотопов в ядрах звезд

Астрономами регистрируются данные по долгоживущим изотопам  $^{26}\text{Al}$  (период полураспада 0.7 млн. лет),  $^{60}\text{Fe}$  (2.6 млн. лет),  $^{44}\text{Ti}$  (59 лет).

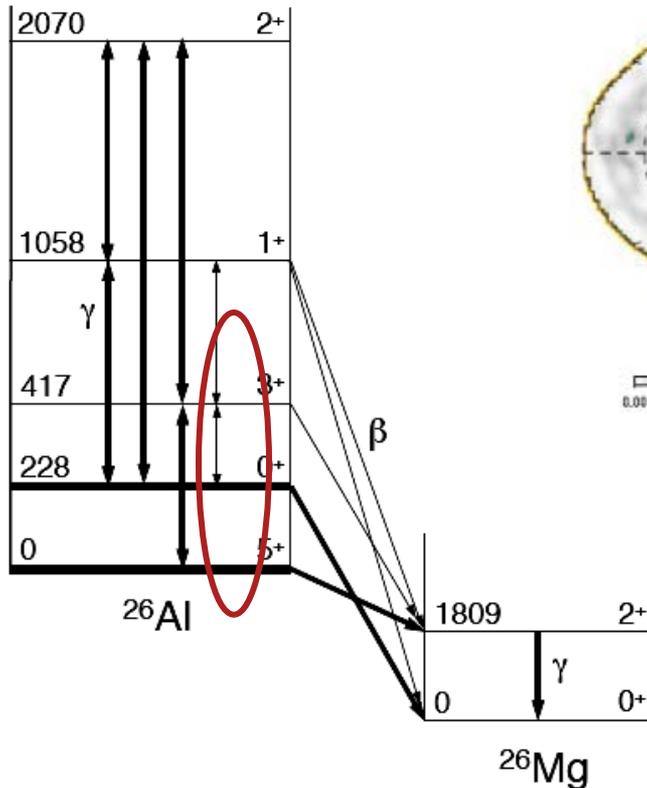
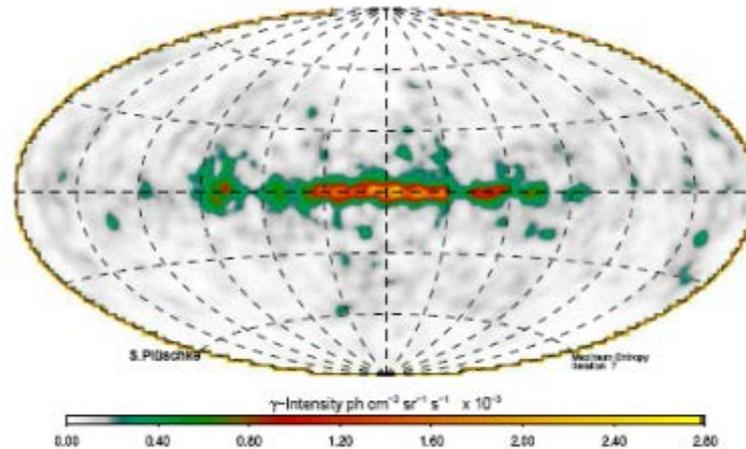


Схема уровней и ядерных переходов в изотопе  $^{26}\text{Al}$



Карта звездного неба в диапазоне гамма-излучения изотопа  $^{26}\text{Al}$ , телескоп COMPTEL

Наличие изотопов является однозначным прямым экспериментальным доказательством процесса нуклеосинтеза в ядрах звезд.

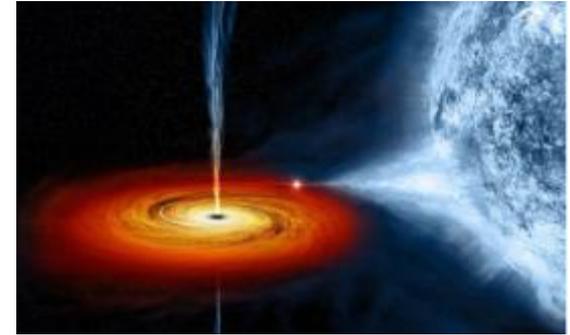
**Предложено множество кандидатов на источник изотопа  $^{26}\text{Al}$  – массивные новые звезды, звезды Вольфа-Райе, коллапс ядра сверхновых и т.д.**

**Для возбуждения реакции синтеза нужен источник гамма-квантов с энергией  $> 2$  МэВ.**

# Направления лабораторной астрофизики

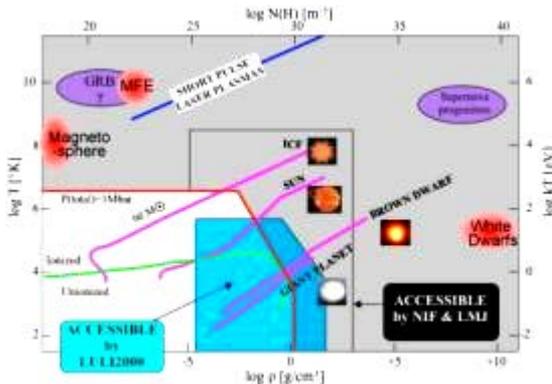
Эксперименты подобию, комплексно воспроизводящие отдельные астрофизические объекты/процессы в лабораторных условиях.

Масштабирование (магнито)-гидродинамических явлений в звездной плазме: плазменные струи, аккреция, образование молодых звезд...



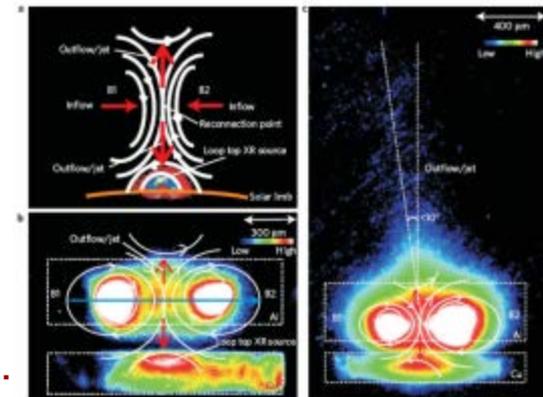
Прямые измерения фундаментальных физических величин, констант и зависимостей для свойств веществ в астрофизических объектах

Широкодиапазонные УРС, ударноволновые фазовые переходы и planetary science, pump-probe experiments, атомные и ядерные константы,...



Верификация существующих теоретических моделей, описывающих ФВПЭ и астрофизические явления в широком диапазоне параметров.

Механизмы генерации релятивистских потоков заряженных частиц. Плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения, WDM, внутренние ЭМ поля в плазме.



**Развитие лазерной техники.  
Пользовательские установки ПВт и МДж класса**

# High-energy PW lasers. OPCPA technology, ps pulses

Institution	Location	Facility	Pulse energy	Pulse duration	Power	Date
LLNL	USA	Nova short pulse	660 J	450 fs	<b>1.3 PW</b>	2000
LANL	USA	Trident	130 J	500 fs	<b>250 TW</b>	2006
LLNL	USA	Titan	300 J	1 ps	<b>300 TW</b>	2007
RAL STFC	UK	Vulcan PW	500 J	500 fs	<b>1 PW</b>	2007
ILE Osaka	Japan	GM-II	420 J	470 fs	<b>0.9 PW</b>	2008
UT Austin	USA	Texas Petawatt	190 J	170 fs	<b>1.1 PW</b>	2008
SNL	USA	Z-Petawatt	500 J	500 fs	<b>1 PW</b>	2009
GSI	Germany	PHELIX	500 J	500 fs	<b>1 PW</b>	2010
SIOFM	China	Shengan-IIU-PW	1 kJ	1 ps	<b>1 PW</b>	2011
Rochester	USA	OMEGA-EP	2 x 1 kJ	1 ps	<b>2 PW</b>	2012
AWE	UK	Orion PW	2 x 500 J	500 fs	<b>2 PW</b>	2012
LLNL	USA	NIF ARC	8 x 500 J	1 ps	<b>4 PW</b>	2014
ILE Osaka	Japan	LFEX / FIREX-II	4 x 500 J	1 ps	<b>2 PW</b>	2015
CESTA Bordeaux	France	PETAL	3 kJ	1.5 ps	<b>2 PW</b>	2016

# Femtosecond PW lasers. Market-available.

Institution	Location	Facility	Pulse energy	Pulse duration	Power, PW	Date
KPSI JAEA	Japan	J-KAREN	20 J	33 fs	<b>0.7 PW</b>	2004
Michigan Uni	USA	HERCULES	15 J	30 fs	<b>0.5 PW</b>	2007
Paris Sud	France	LASERIX	33 J	60 fs	<b>0.5 PW</b>	2007
IAP RAS - VNIIEF	Russia	PEARL	25 J	45 fs	<b>0.5 PW</b>	2008
RAL/STFC	UK	Astra Gemini	15 J x 2	30 fs	<b>1 PW</b>	2008
APRI GIST	Korea	KLF	30 J	33 fs	<b>1 PW</b>	2010
IOP CAS	China	XL-III	32 J	28 fs	<b>1.1 PW</b>	2011
Nebraska-Lincoln	USA	Diocles	20 J	30 fs	<b>0.7 PW</b>	2012
Berkley Lab	USA	BELLA	30 J	25 fs	<b>1.3 PW</b>	2012
OSEO	France	SAPHIR	25 J	25 fs	<b>1 PW</b>	2013
SIOM	China	Quanguang	50 J	28 fs	<b>1.8 PW</b>	2014
KPSI JAEA	Japan	J-KAREN PW	30 J	30 fs	<b>1 PW</b>	2015
HZDR	Germany	DRACO	30 J	30 fs	<b>1 PW</b>	2016
CLPU Salamanca	Spain	Vega-3	25 J	25 fs	<b>1 PW</b>	2016
Uni Bucharest	Romania	CETAL	30 J	30 fs	<b>1 PW</b>	2016



# Multi-PW lasers. High rep rate PW lasers.



[eli-laser.eu](http://eli-laser.eu)

**ELI-BL, Prague – 2 x 3 PW @ 0.1 Hz,  
2018 Users' run**

**ELI-ALPS, Szeged – 3 PW @5 Hz**

**ELI-NP, Bucharest – 2 x 1 PW @1 Hz  
– 2 x 10 PW low rep**

**Mercury – 1 PW (60 J) @ 10 Hz – LLNL, 2017**

**POLARIS – 1 PW (150 J) @ 0.1 Hz - FSU Jena, 2017**

**PEneLOPE – 1 PW (150 J) @ 1 Hz – HZDR, 2017**

**Qiangguang 10 PW, SIOM, expected 2018**

**Vulcan-10 PW upgrade, STFC**

**OPAL @ Omega EP (200 PW, LLE), etc...**



[cilexsaclay.fr](http://cilexsaclay.fr)

**Apollon 10 PW @ 15 fs  
2018 Users' run with 5 PW**



**IZEST**  
International Zeta-Exawatt  
Science Technology

[xcels.iapas.ru](http://xcels.iapas.ru)

**XCELS – IAP RAS,  
10 x 15 PW  
CREMLIN initiative**

# PW-class lasers. Widely available, and even on-market

## ПВт лазеры с пикосекундным импульсом и кДж уровнем энергии

Первые эксперименты в 2006 г. (LLNL, RAL), сегодня в работе **10 установок** мощностью  $\geq 1$  **ПВт**, ряд установок создаются как **комплиментарные**

## Фемтосекундные ПВт лазеры, «технологическое решение»

Первые эксперименты в 2008 г. (Michigan Uni, RAL), в работе ~ **15 установок** мощностью от **0.3 до 1.3 ПВт**, строятся/закуплены ~ **10 установок**.

Финансируется создание более **20 фемтосекундных лазеров** мощностью **200-250 TWm** (на рынке есть готовые решения стоимостью ~ 5 млн.€)

## Мульти-ПВт лазеры – проекты

**В 2018 г. станут доступны для пользователей** 2 установки мощностью **3-5 ПВт**, создаются и проектируются комплексы мощностью в **десятки ПВт**:

Appollon (CILEX, CEA), ELI Beamlines (Prague), ELI-NP (Bucharest), Vulcan 10PW (RAL), Quangguang 10 PW (SIOM), XCELS (Н.Новгород))

## Лазеры для ИТС

**NIF** (@3 $\omega$  1.8 МДж за 3 нс = **0.6 ПВт**, 2010 г., доступ пользователей с 2014 г.)

**LMJ** (@3 $\omega$  1.4 МДж за 3 нс = **0.4 ПВт**, доступ пользователей с 2018 г.)

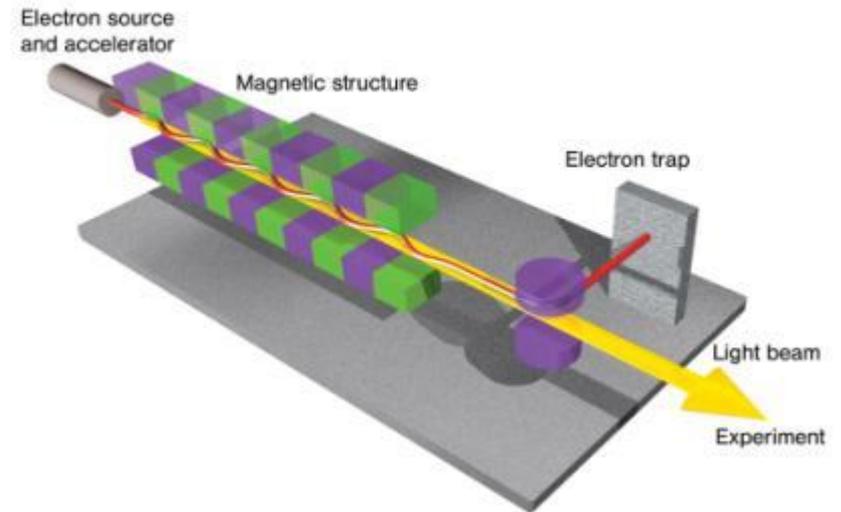
**УФЛ-2М** (@2 $\omega$  2.8 МДж за 3 нс = **0.9 ПВт**, ввод в эксплуатацию в 2017 г.??)

**Shengang-IV** (@3 $\omega$  1.5 МДж за 3 нс = **0.5 ПВт**, ???)

# Ultra-bright X-ray sources. Free-electron lasers

Photon energy – 1-25 keV range  
Intensity – up to  $5e17$  W/cm<sup>2</sup>  
Coherent, monochromatic.  
100 fs time resolution for pump-probe

Combined with sub-kJ and sub-PW  
optical lasers for HEDP research



Facility	Location	$E_{ph}$ , keV	$E_e$ , GeV		Date
LCLS	USA	10	15	Fixed gap (out vacuum)	2009
SACLA	Japan	20	8.5	Variable gap (in vacuum)	2011
European XFEL	Germany	24	17.5	Variable gap (out vacuum)	2017
PAL-XFEL	Korea	12	10	Variable gap (out vacuum)	2017
SwissFEL	Switzerland	12	6	Variable gap (in vacuum)	2018
LCLS-II	USA	25	13.5	1 MHz programmable, Variable gap (out vacuum)	2019

# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW

# Plasma jets and shock waves with sub-kJ lasers

Investigations on HED:

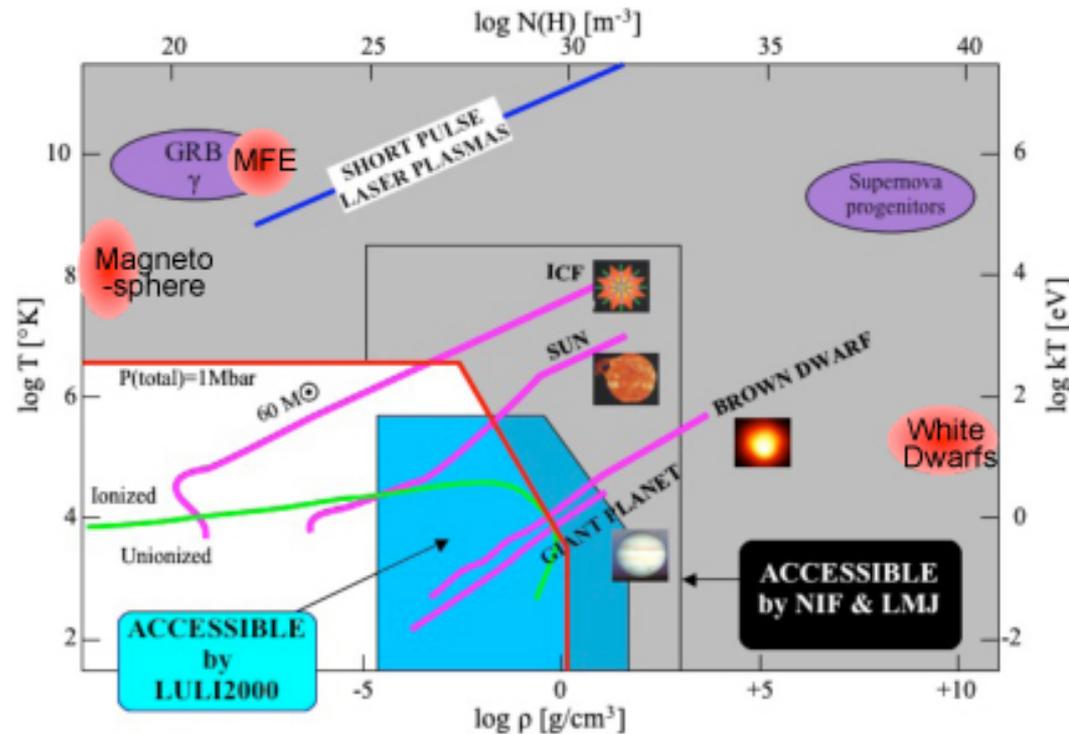
$$E_{\text{ext}} > E_{\text{rest}}$$

$10^{11} \text{ J/m}^3 \sim E_{\text{rest}}$   
density energy of  $\text{H}_2$  molecule



Large-volume, high-energy case:  
 $V \sim \text{mm}^3$ ,  $E_{\text{impact}} > 100 \text{ J}$   
*ICF, laboratory astrophysics,  
 plasma (magneto)hydrodynamics,  
 shock waves, wide-range EoS*

nanosecond, kJ – MJ lasers

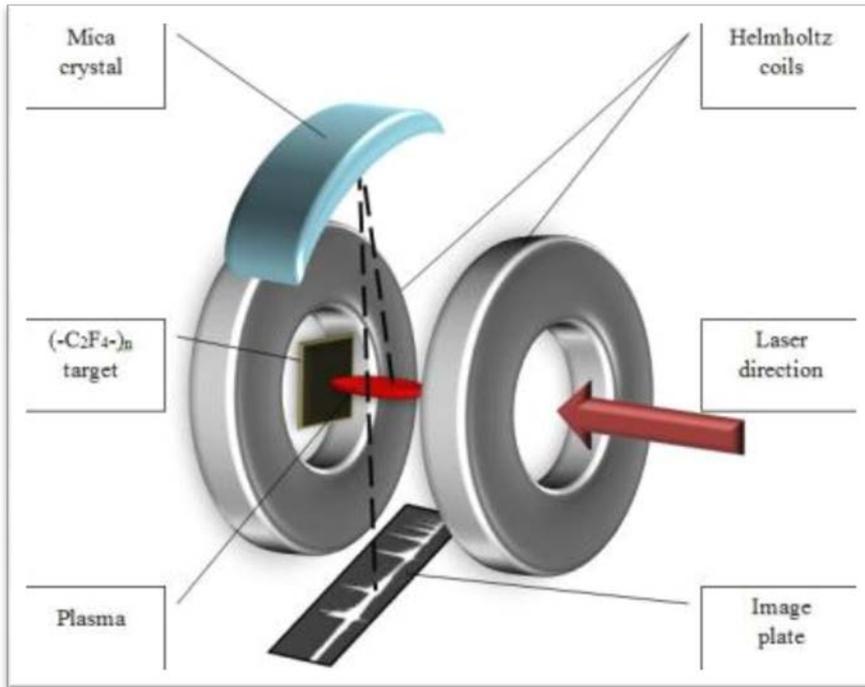


High-intensity, micro-volume case:  
 $V \sim \text{tens } \mu\text{m}^3$ ,  $E_{\text{impact}} \sim \text{few to tens J}$   
*relativistic plasma,  
 charge particle acceleration,  
 radiation dominant plasma,  
 high-harmonic generation, etc...*

pico/femtosecond, multiTW - PW lasers

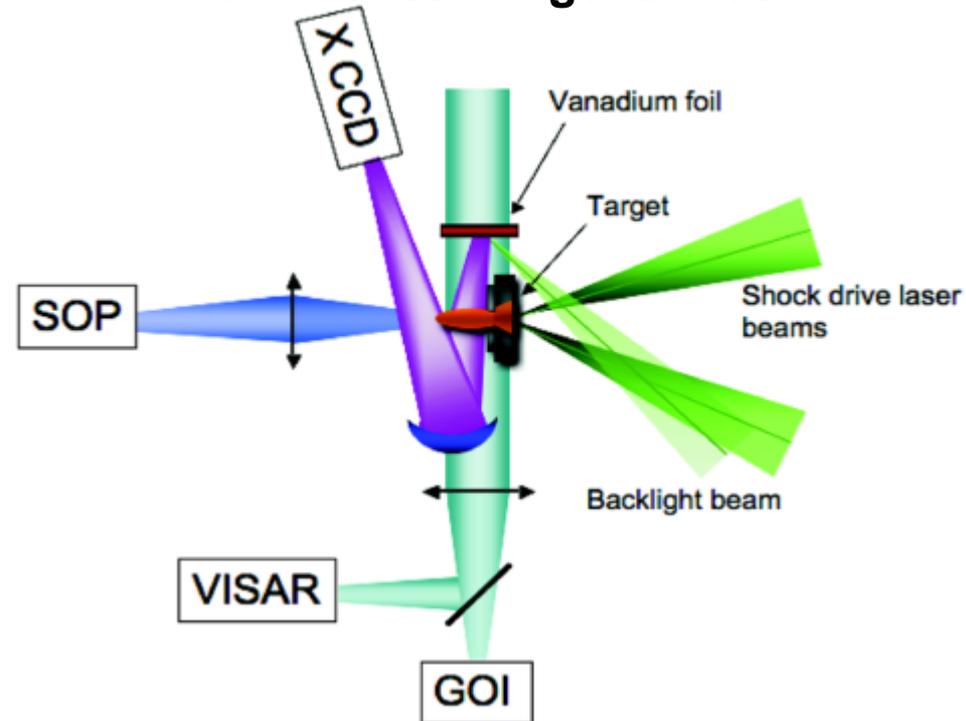
# Laser generated jets. X-ray diagnostics concept

Hot/warm plasma ( $T_e$  in 10-300 eV range) from the front target surface



X-ray imaging spectroscopy measurements on electron density and temperature with spatial resolution along the jet propagation

“Cold” plasma flows ( $T_e < 10$  eV range) from the rear target surface



X-ray shadowgraphy 2D imaging and measurements on plasma ion/“bulk” density with ps temporal resolution

*For both cases, the studies on a jet evolution can be done in presence of external magnetic field, ambient gas or plasma, solid obstacle, counter-propagating flows etc.*

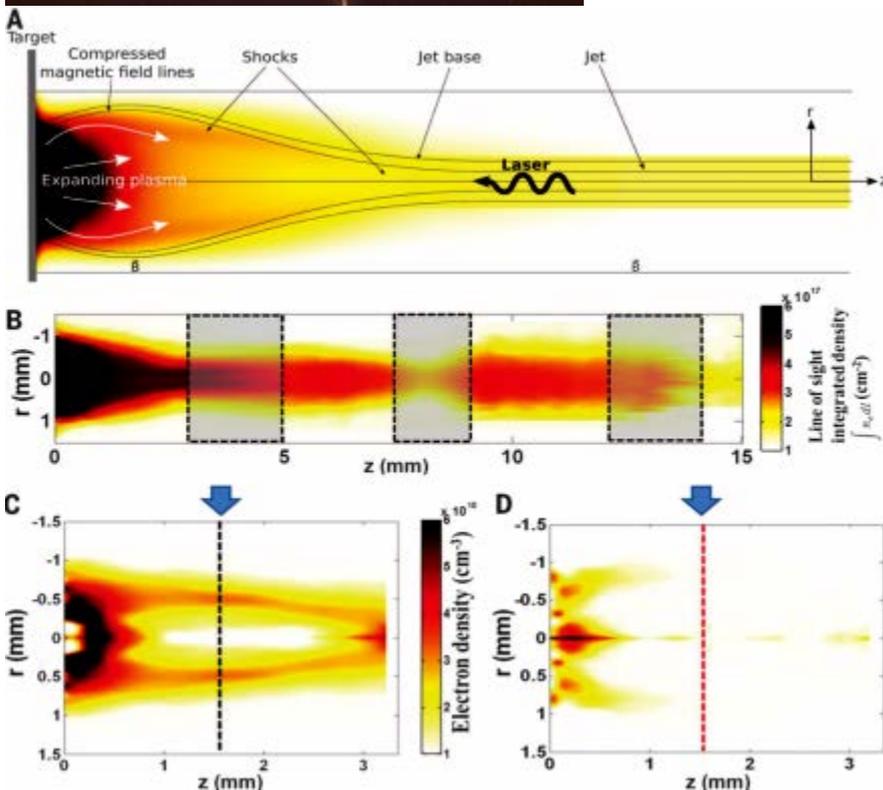
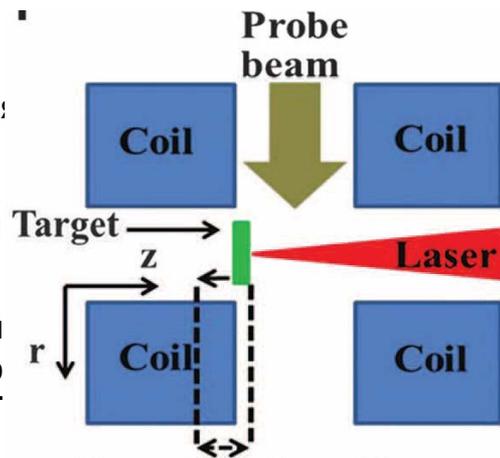
# Воссоздание в лабораторных условиях плазменных струй в молодых звездных образованиях в присутствии сильного полоидального магнитного поля



Астрофизический объект – сверхзвуковые выбросы плазмы (джеты) на полюсах протозвездного образования:

Лабораторная астрофизика с использованием мощных лазерных импульсов

Схема эксперимента по генерации плазменных струй с помощью нс лазера, в присутствии внешнего магнитного поля 20 Т



Коллимирование плазменного потока во внешнем магнитном поле, карта электронной плотности Al плазмы.

Экспериментальные и модельные результаты по измерению интегрального профиля плотности плазменной струи в присутствии (C) и в отсутствии (D) внешнего магнитного поля

- ✓ Подтвержден механизм генерации сверхзвуковых и узконаправленных плазменных струй за счет воздействия полоидальных магнитных полей.
- ✓ Доказано существование в основании магнитно-коллимированной струи интенсивного рентгеновского источника.
- ✓ Результаты отлично согласуются с астрономическими наблюдениями для целого ряда молодых звездных объектов.

Опубликовано в *Science* 346, 325 (2014)

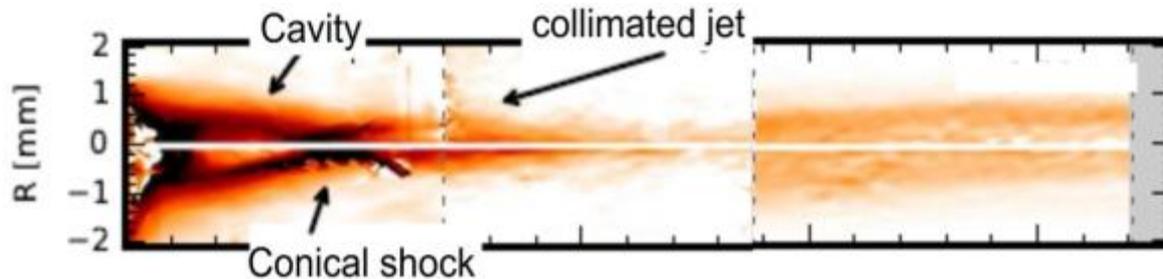
# Studies of plasma jets phenomena - Recombining plasma

Ns Long pulse of  $I = 10^{13}-10^{14} \text{ W/cm}^2$

Cm long propagating plasma flow far away from the laser interaction area

Few eV/tens of eV electron temperatures – below inner-shell ionization

Electron densities much lower than critical –  $10^{18}-10^{19} \text{ cm}^{-3}$  range



*Interferometry data on Ne map*

**Recombining (i.e. ionization is negligible) plasma approach is valid – appropriate diagnostics is needed to be (re)emerged.**

# Magnetized plasma jet experiment setup

## ELFIE facility

### Laser:

Wavelength  $\lambda = 1.053 \text{ nm}$

Duration  $\tau = 0.5 - 1 \text{ ns}$

Energy  $E = 5 - 60 \text{ J}$

Focal spot diameter  $D = 750 \mu\text{m}$

### FSSR:

Spherically bent mica

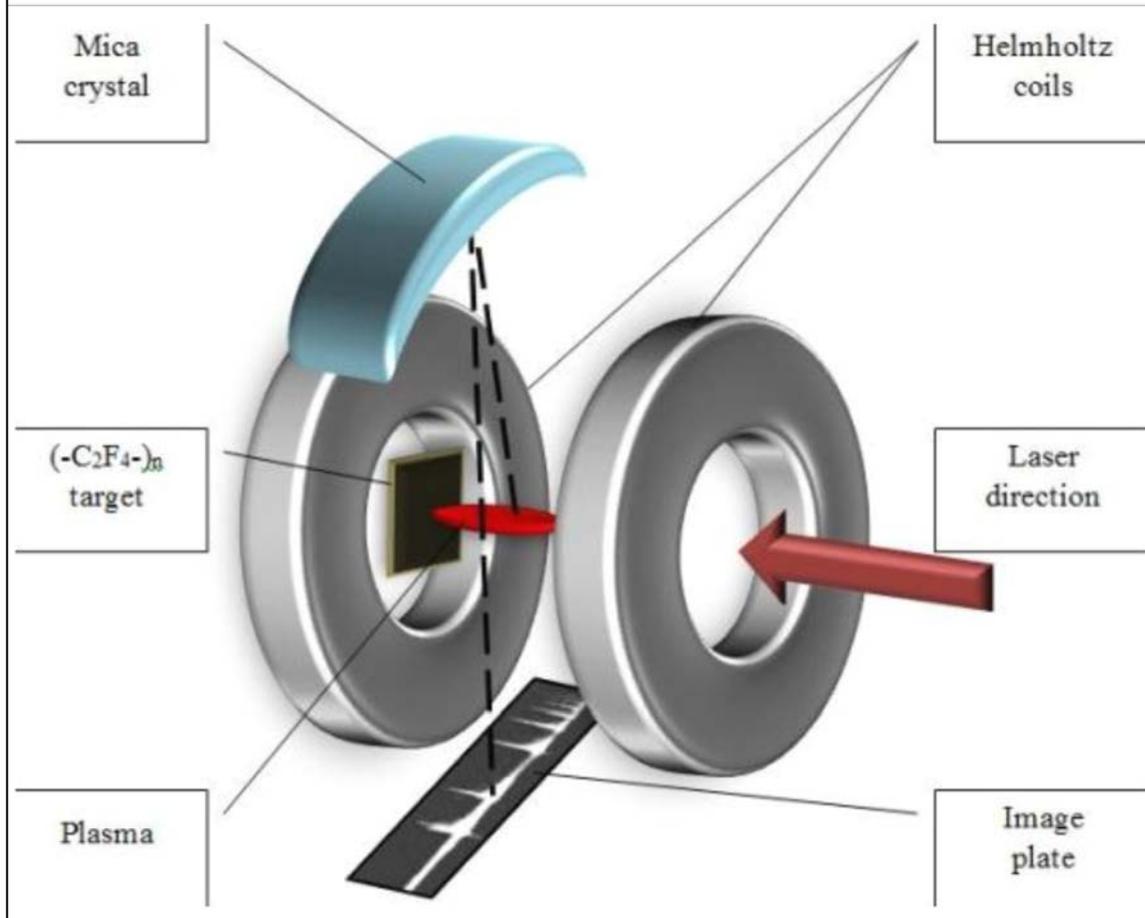
Lattice spacing  $2d = 19.9376 \text{ \AA}$

Radius of curvature  $R = 150 \text{ mm}$

### Magnetic field:

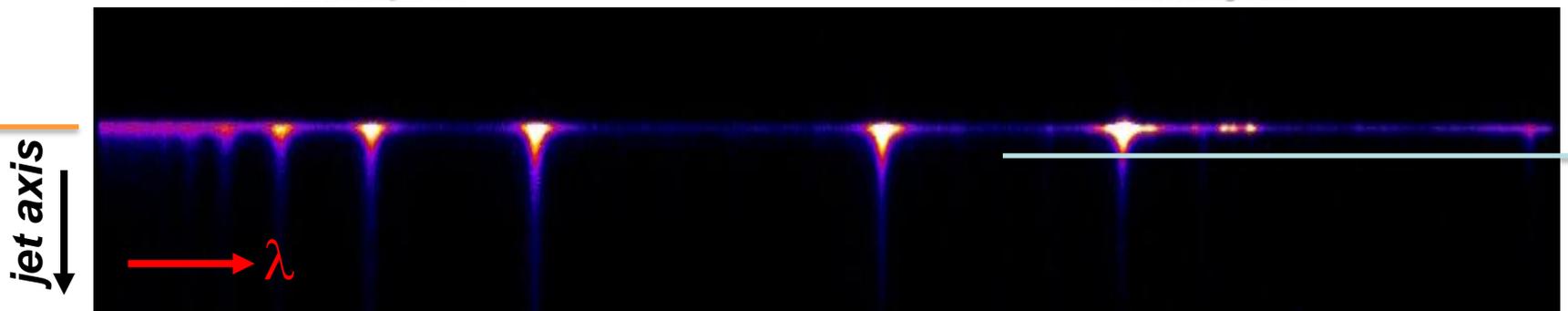
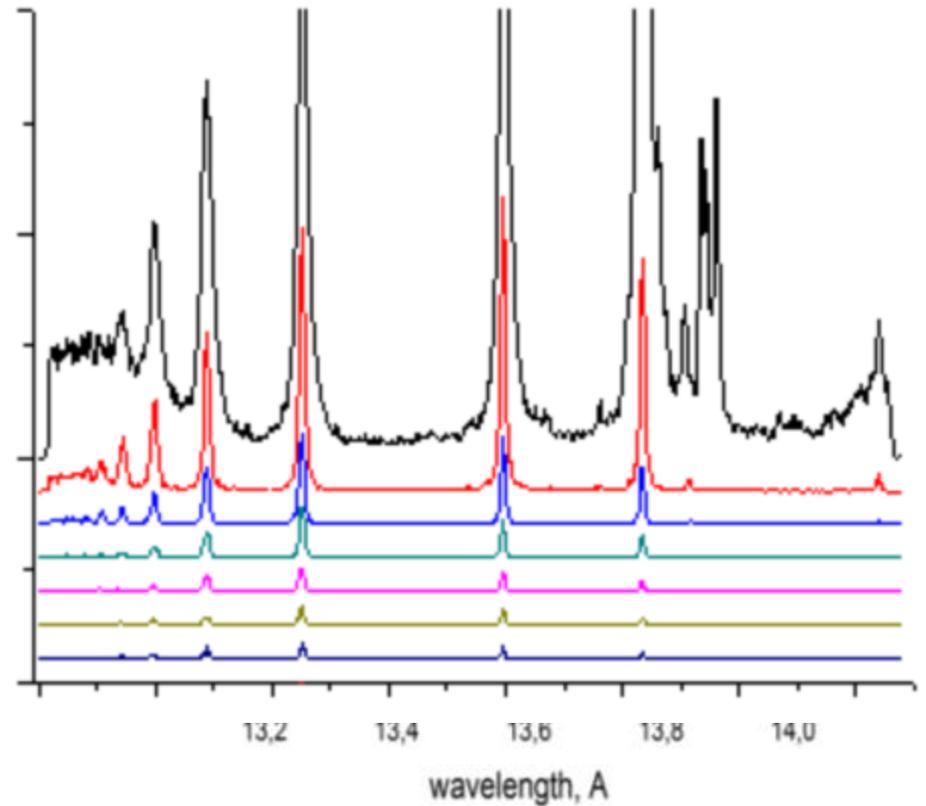
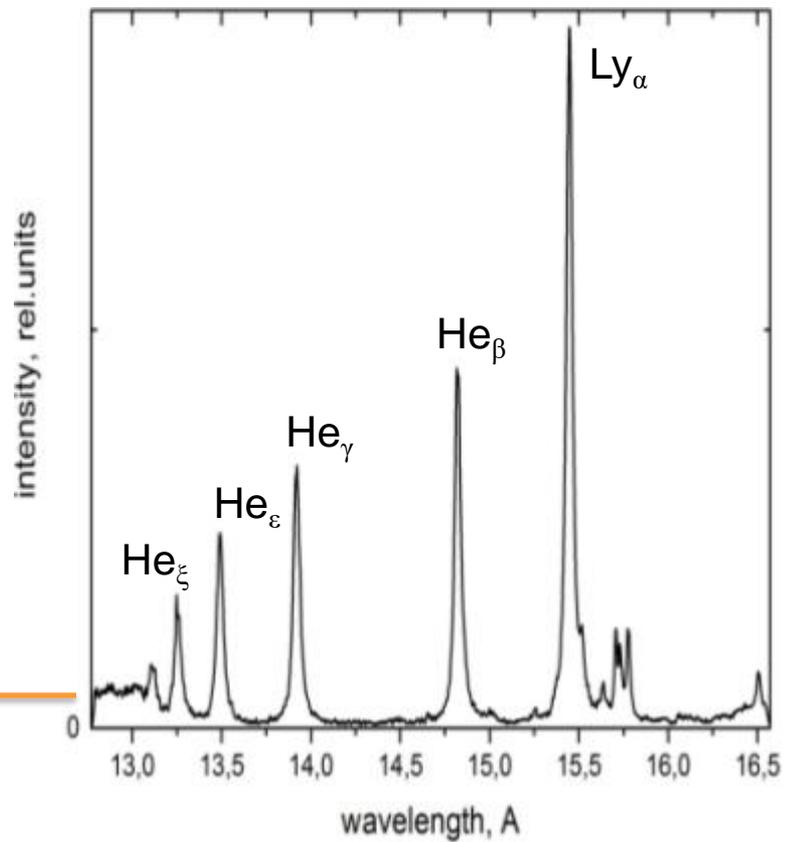
Helmholtz pulsed coils  
poloidal component

$B = 20 \text{ T}$

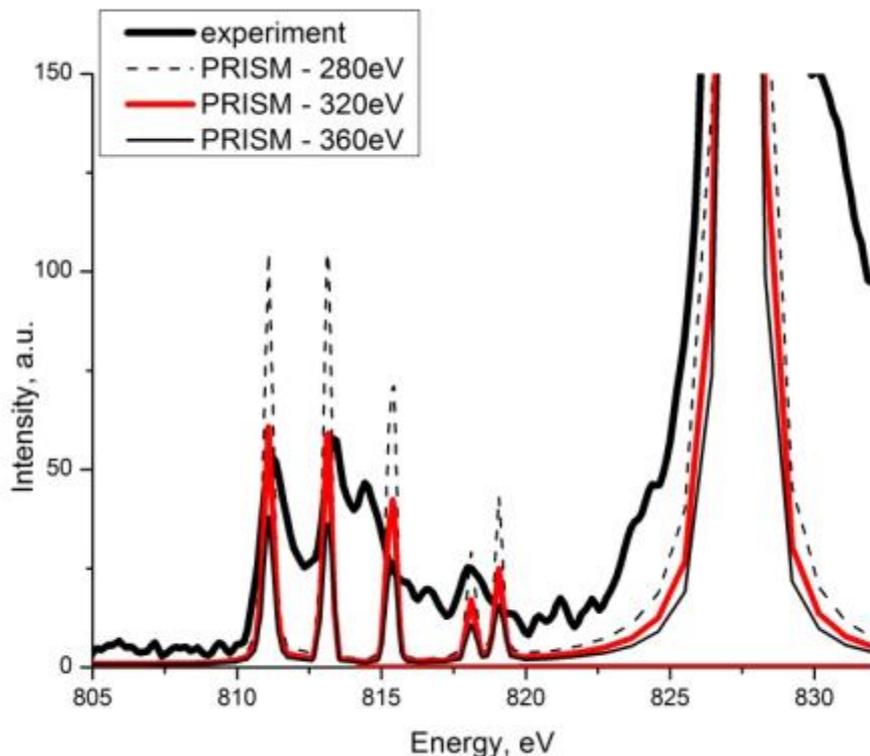
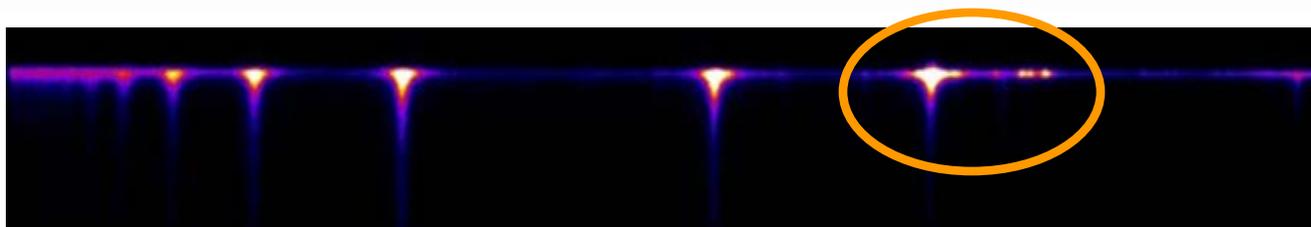


*The studies on a jet evolution can be done in presence of not only external magnetic field but as well with ambient gas or plasma, solid obstacle, pre- and counter-propagating flows etc.*

# Typical x-ray spectra emitted by a plasma jet



# Plasma parameters at laser irradiated target - Ly $\alpha$ satellites

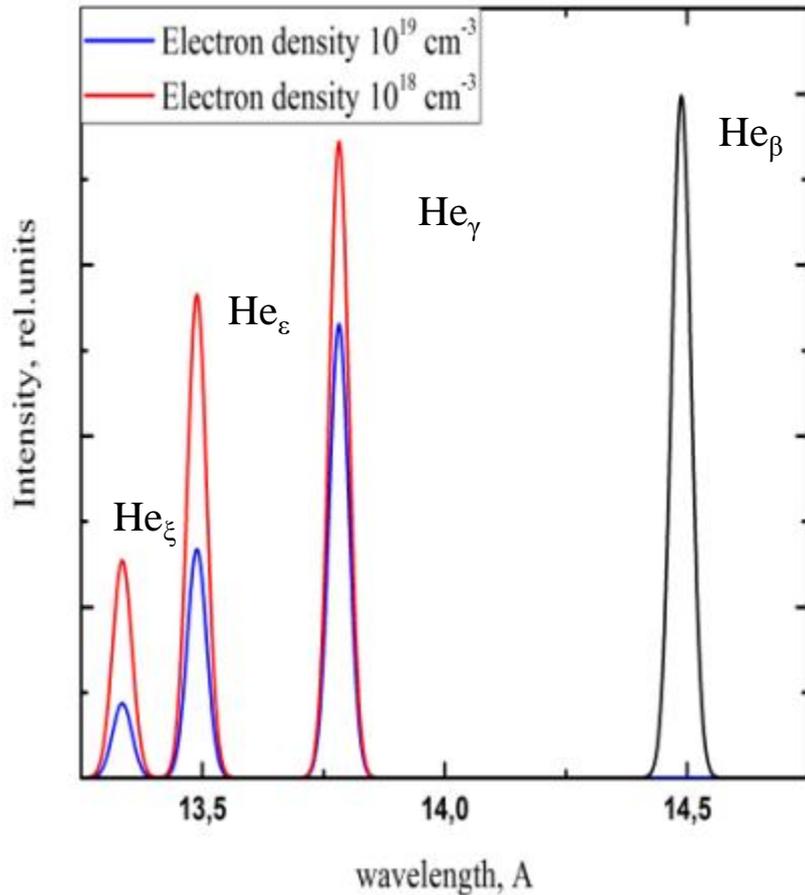


At target surface the plasma is in ionization mode,  $T_e$  ranged in 200-400 eV

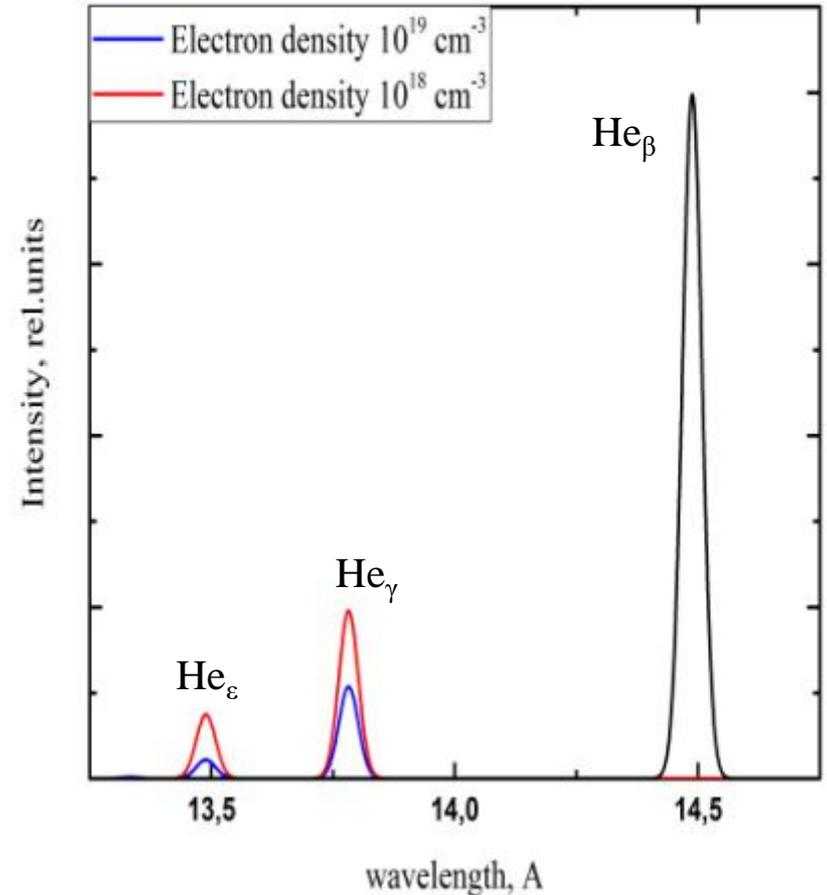
Modeling by FLYCHK or PrismSPECT codes in NLTE mode.

Plasma parameters are easily determined with 10% accuracy

# Recombining vs Ionizing plasma spectra



**Recombination  
plasma**



**Ionizing  
plasma**

# Full set of equations

Populations can be expressed

using recombination rate  $\beta_i^Z$  and ionization rate  $S_i^Z$

$$N_i^Z = \beta_i^Z N_e N_1^{Z+1} + S_i^Z N_1^Z$$

**Ground state (i=1)**

**Excited state (i ≥ 2)**

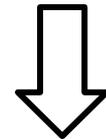
$$\frac{dN_1^Z}{dt} = \sum_{i', Z'} K_{1i'}^{ZZ'} N_{i'}^{Z'} \Rightarrow \frac{dN_1^Z}{dt} = \beta^Z N_e^2 N_1^{Z+1} - S^Z N_e N_1^Z$$

where the recombination  $\beta_i^Z$  and ionization  $S_i^Z$  rates can be obtained from following expressions:

$$\beta^Z = N_e^{-2} \left[ K_{11}^{Z, Z+1} + N_e \sum_m K_{1m}^{Z, Z} \beta_m^Z \right]$$

$$S^Z = N_e^{-1} \sum_m K_{1m}^{Z+1, Z} S_m^Z$$

$$\sum_{i', Z'} K_{ii'}^{ZZ'} N_{i'}^{Z'} = 0$$



$$\sum_{i'} K_{ii'}^{ZZ'} S_{i'}^Z = -K_{i1}^{ZZ}$$

$$\sum_{i'} K_{ii'}^{ZZ} \beta_{i'}^{Z'} = -\frac{K_{i1}^{Z, Z+1}}{N_e}$$

# Intensity ratios

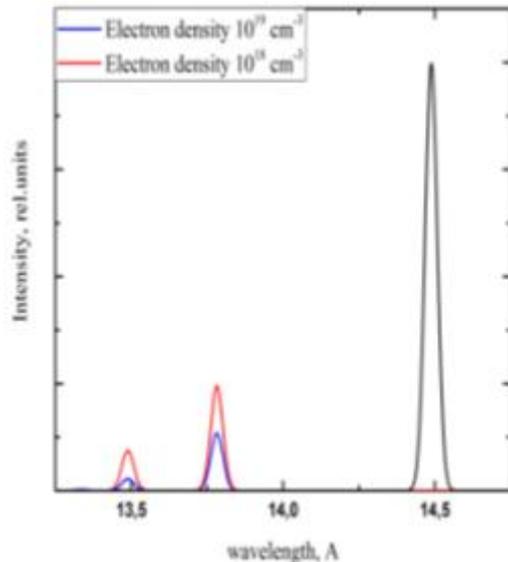
For intensity ratio of two spectral lines corresponding to transitions  $m \rightarrow n$  and  $k \rightarrow l$

$$\frac{I_{mn}^Z}{I_{kl}^Z} = \frac{A_{mn} [\beta_m^Z N_e N_1^{Z+1} / N_1^Z + S_m^Z]}{A_{kl} [\beta_k^Z N_e N_1^{Z+1} / N_1^Z + S_k^Z]}$$

where  $A_{mn}$  and  $A_{kl}$  are corresponding probabilities of radiative transition and  $N_1^Z$  is a ground state population of Z ion.

## Ionizing plasma

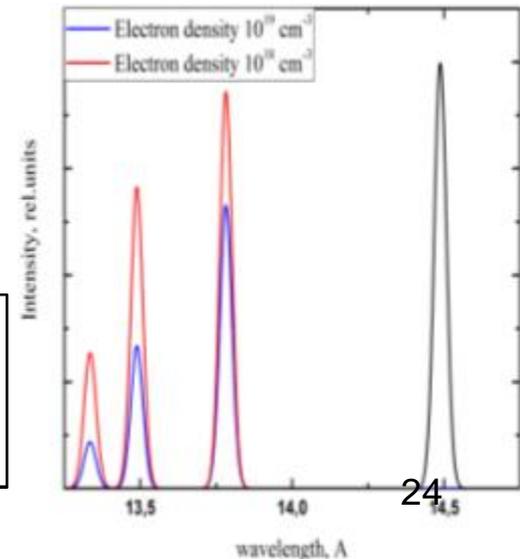
$$\frac{N_1^{Z+1}}{N_1^Z} \rightarrow 0$$



$$\frac{I_{mn}^Z}{I_{kl}^Z} = \frac{A_{mn} S_m^Z}{A_{kl} S_k^Z}$$

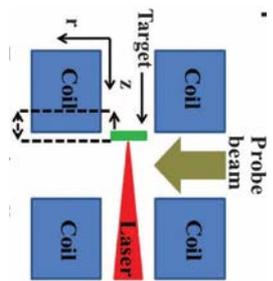
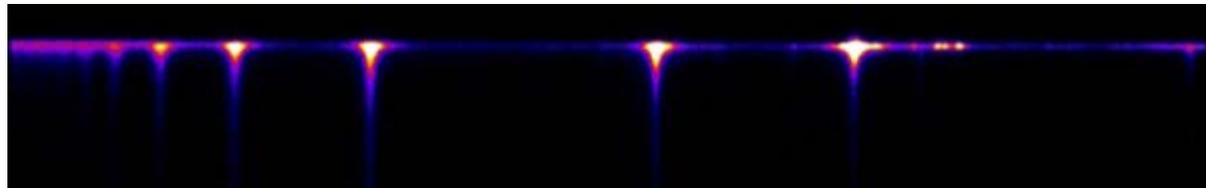
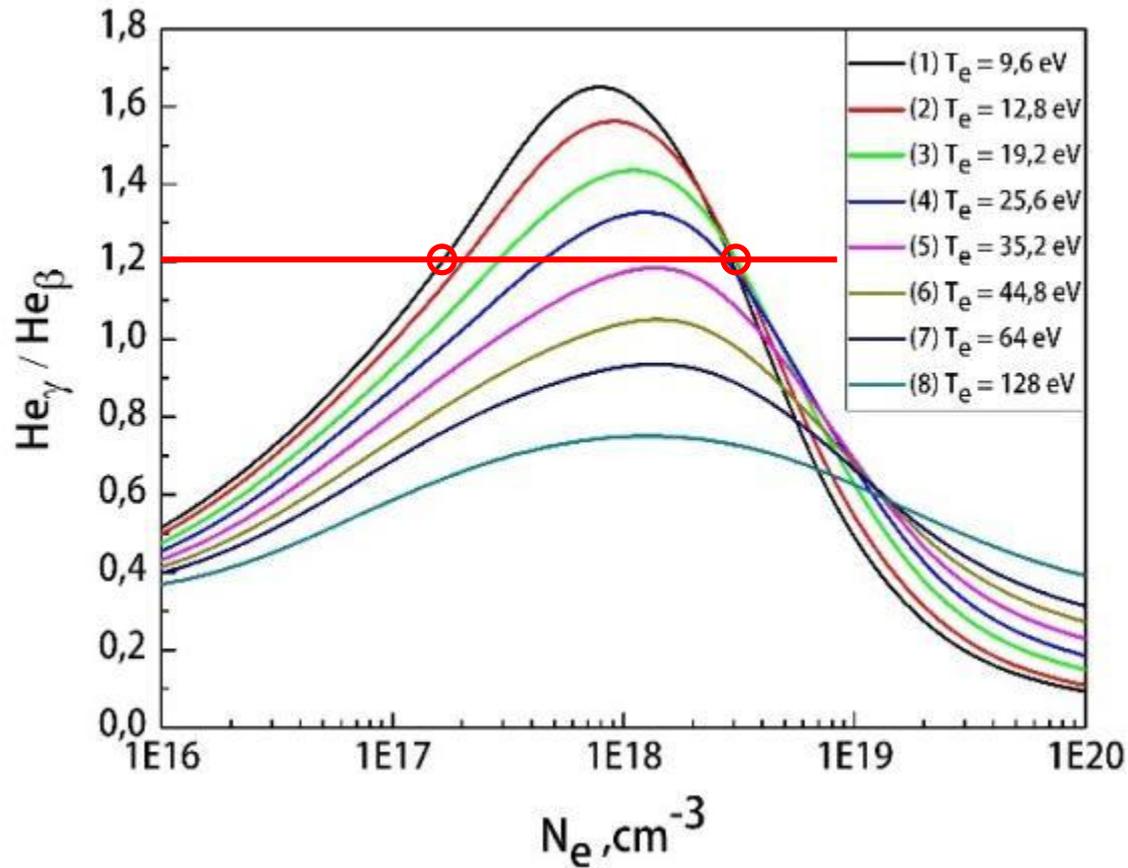
## Recombining plasma

$$\frac{N_1^{Z+1}}{N_1^Z} \rightarrow \infty$$



$$\frac{I_{mn}^Z}{I_{kl}^Z} = \frac{A_{mn} \beta_m^Z}{A_{kl} \beta_k^Z}$$

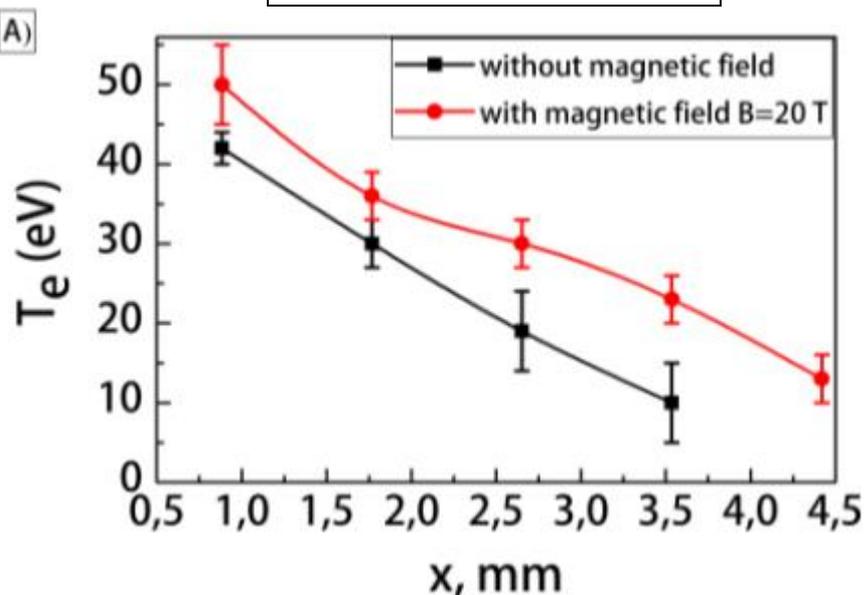
# Application of intensity rates curves



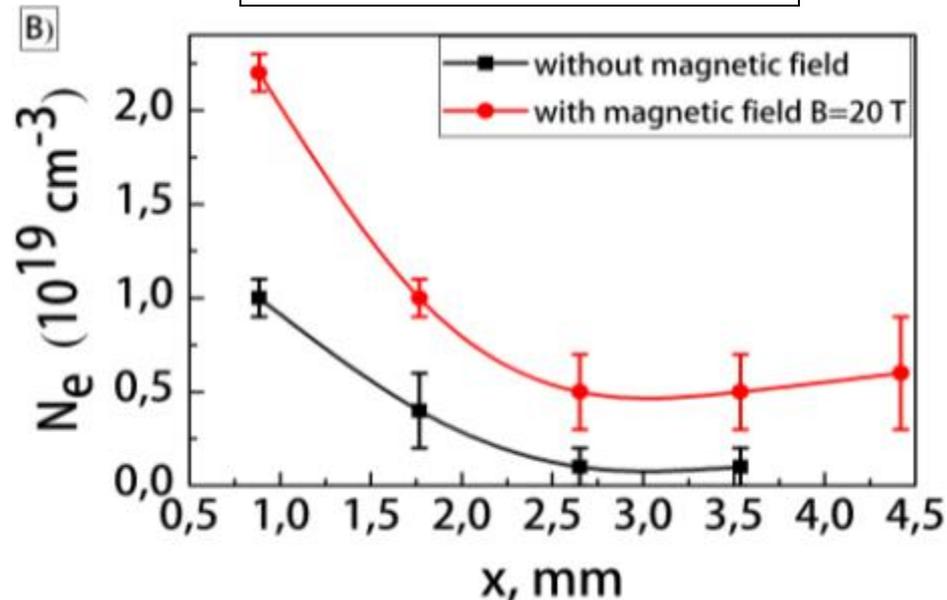
The measurements on intensity rates for a set of spectral lines allows to avoid an ambiguity and to determine both  $N_e$  and  $T_e$

# e- temperature and density of a single plasma jet in B-field

## Temperature

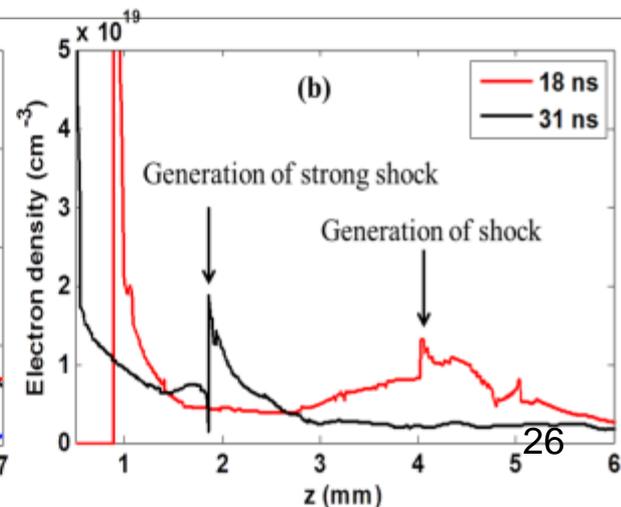
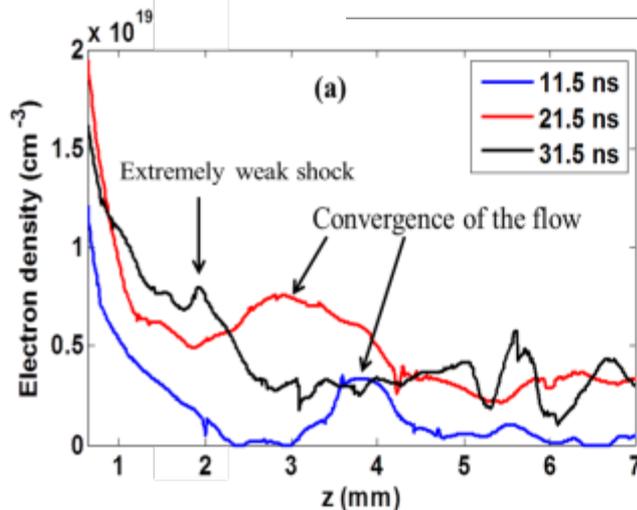


## Density



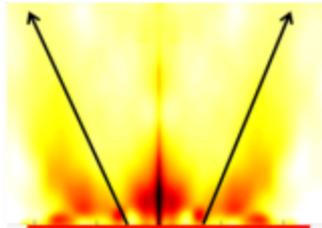
**B = 6 T, E<sub>laser</sub> = 60 J**

**N<sub>e</sub> values are consistent with that one measured by optical interferometry method at a certain time**



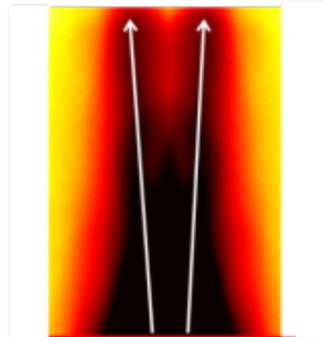
# The role of B-field pressure to collimate a plasma jet

Hemispherical expansion



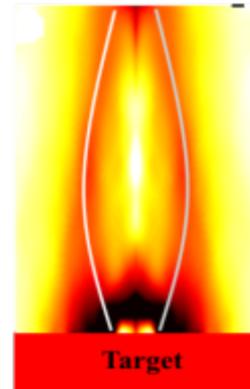
No B-field

B-field not sufficient to redirect the plasma flow towards the axis



Weak B-field

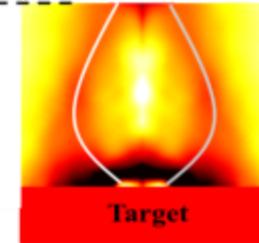
B-field strong enough to redirect the plasma flow towards the axis



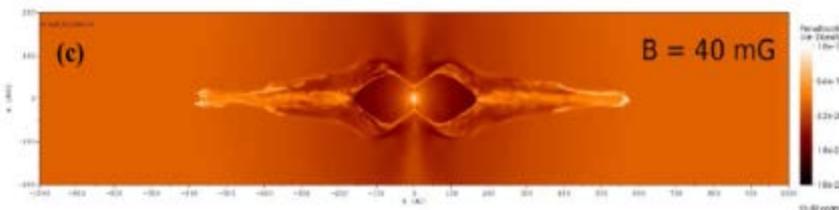
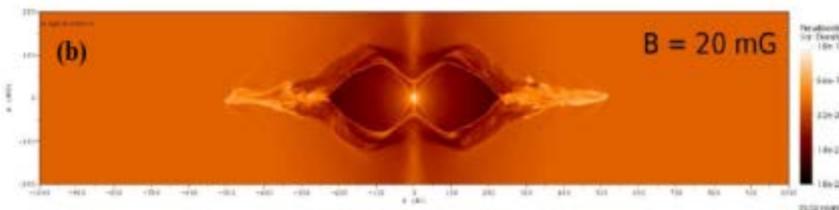
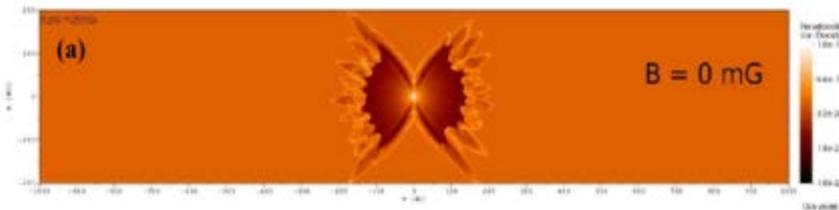
Strong B-field

B-field even stronger than the case on the right.

Position of the tip of the cavity when increasing the magnetic pressure and keeping a constant ram pressure

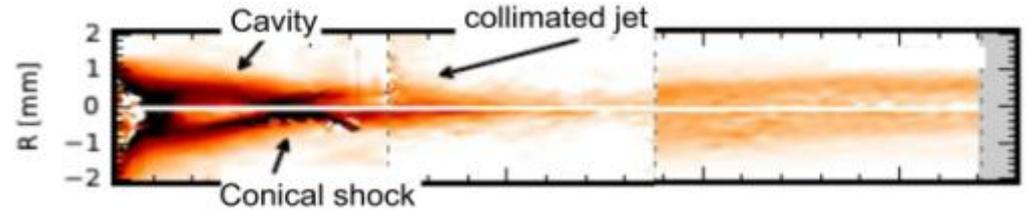
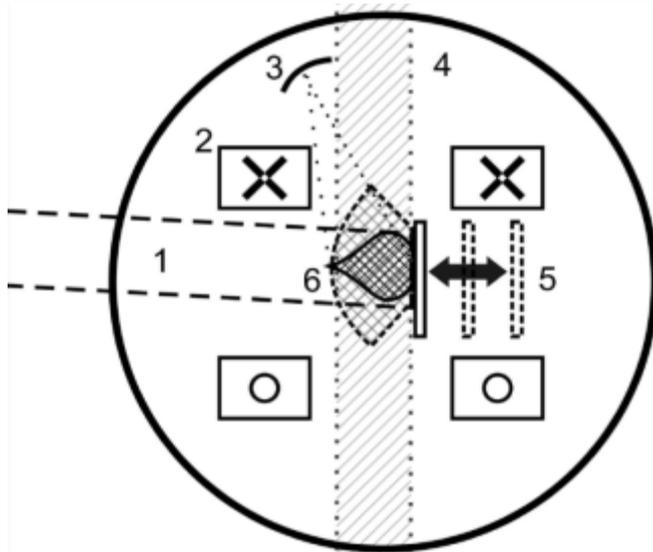


Stronger B-field



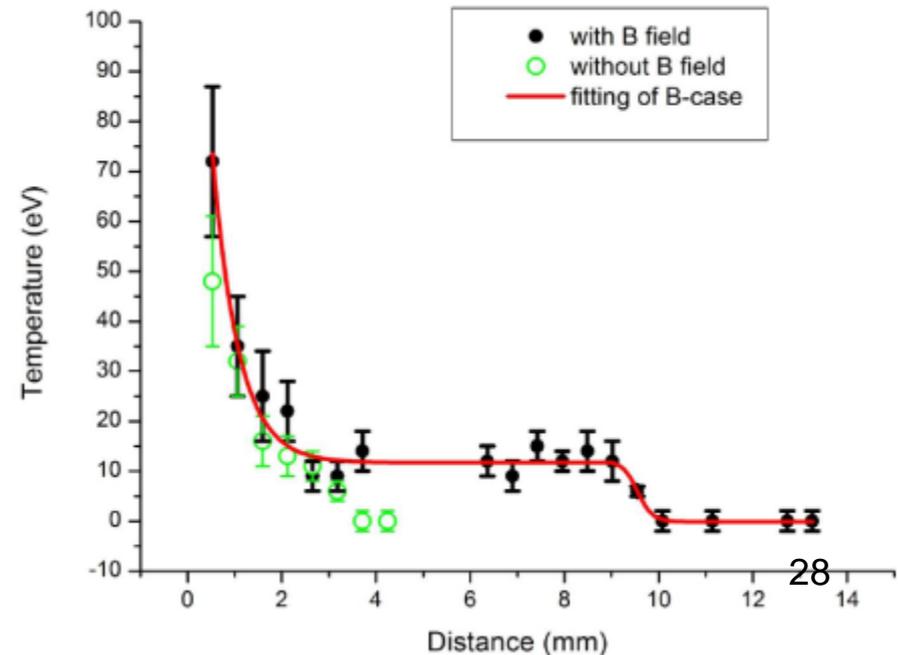
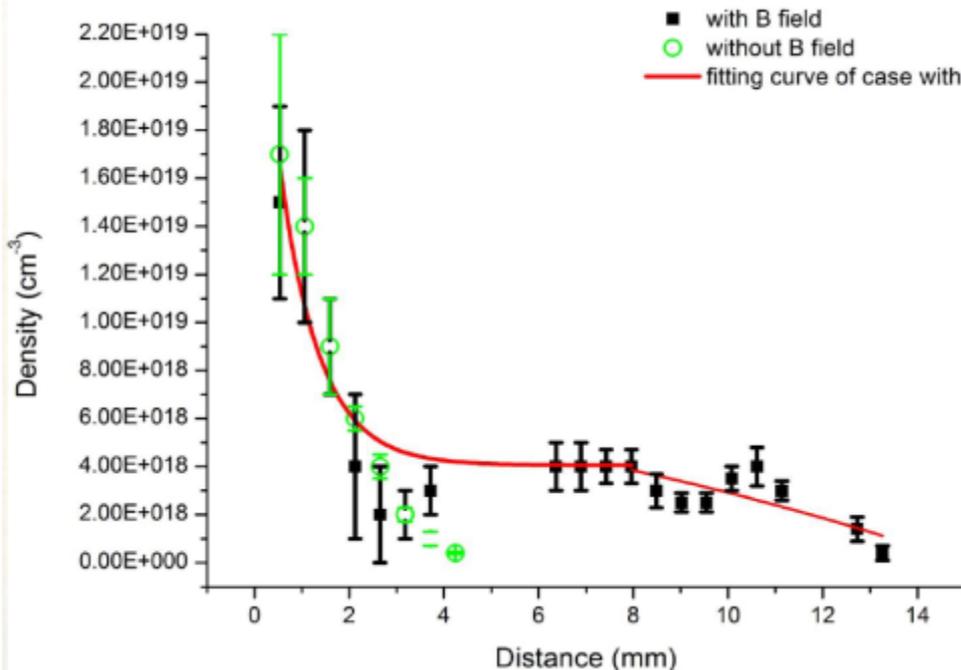
The competition of ram and magnetic pressure simulated for ns laser plasma and YSO astrophysical phenomena (RAMSES code)

# Long range measurements along the jet axis



## Interferometer data on Ne map

// D.P. Higginson et al. *Phys. Plasmas*, accepted (2016)

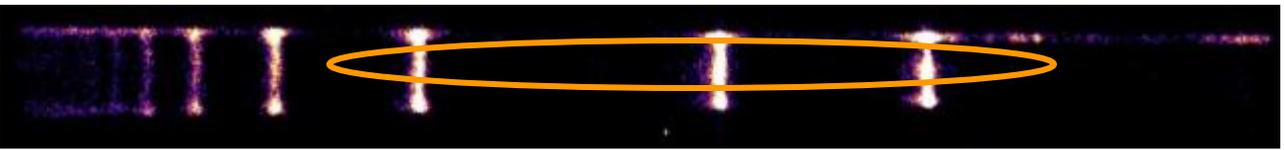


# Counter propagating plasma flows and ambient gas environment

Preliminary data



no gas,  
no B



no gas,  
B = 20 T

The effect of **B-field to make two plasma flows effectively interacting** is obvious



Neon, 0.5 bar



Neon, 0.5 bar  
single jet

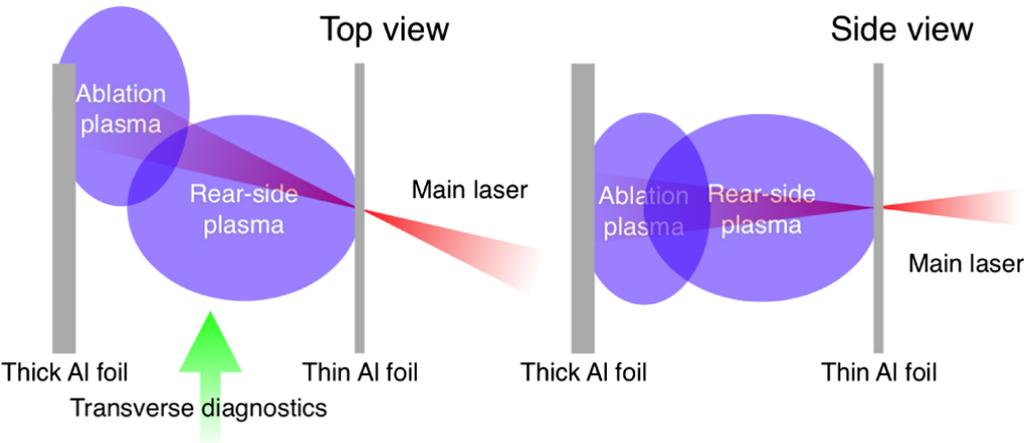
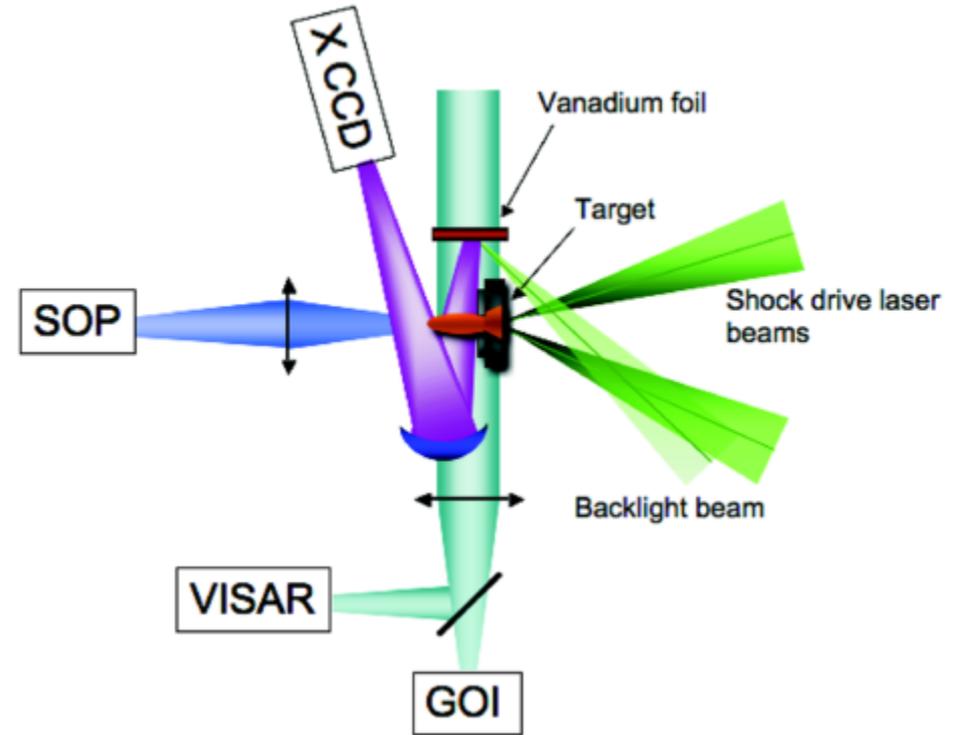
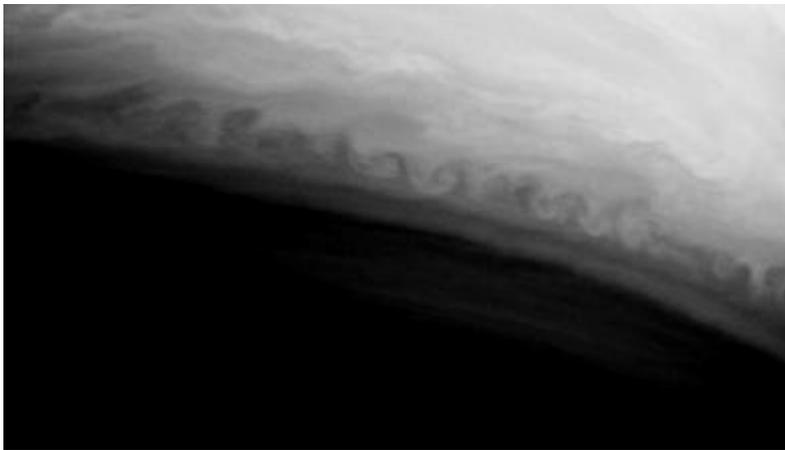
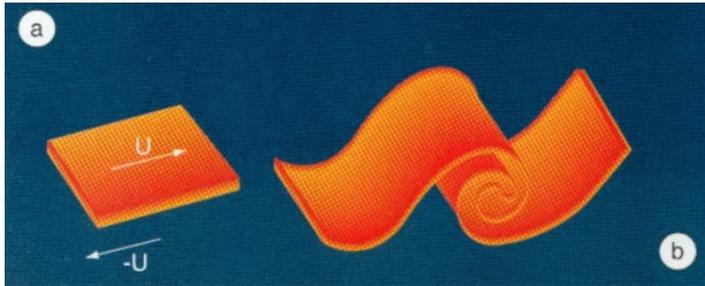
**Magnetically confined plasma jet effectively interacts with ambient gas**

**Ne gas X-ray emission** appears only when **colliding plasma flows** formed the region with high electron density

# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- **Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений**
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW

# Kelvin - Helmholtz instabilities at astrophysically related plasma

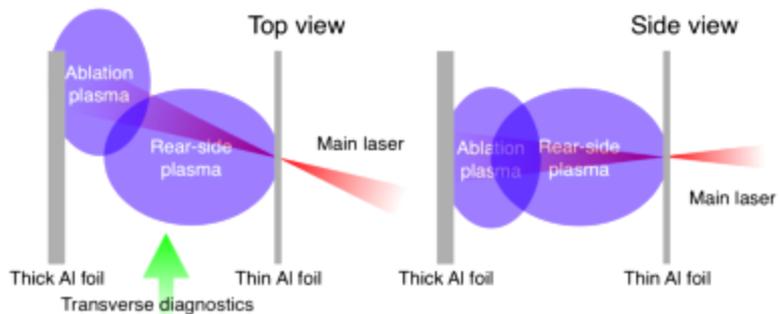


**Main laser:**  
 1 ns, 1w / 2w,  
 300 J / 1000 J,  
 d = 400 μm  
 $I = 10^{14} \text{ W/cm}^2$

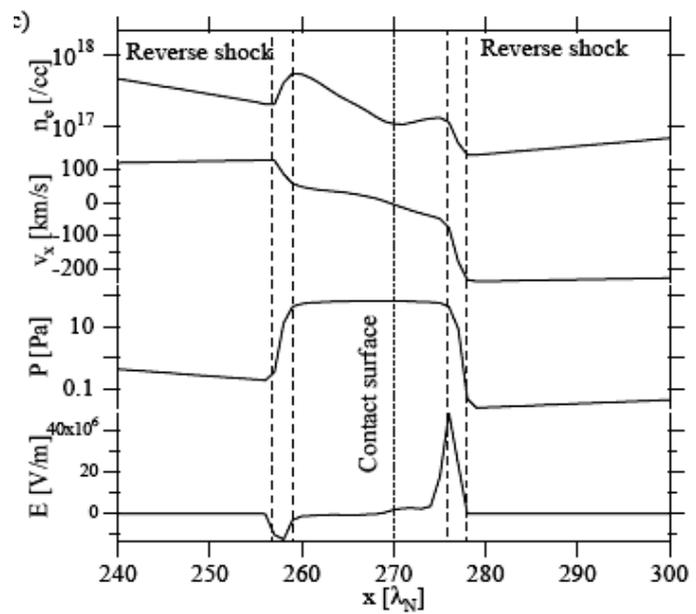
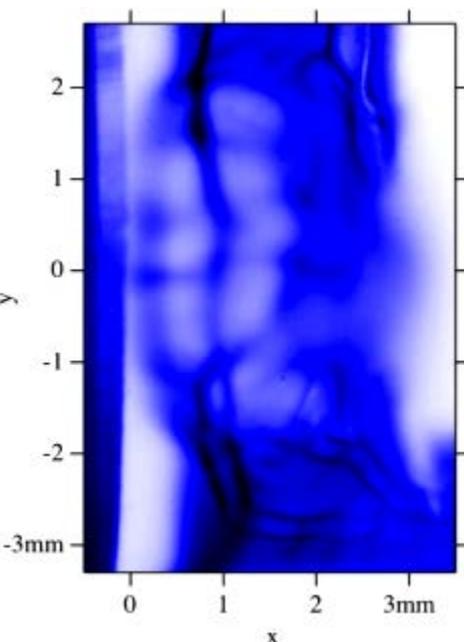
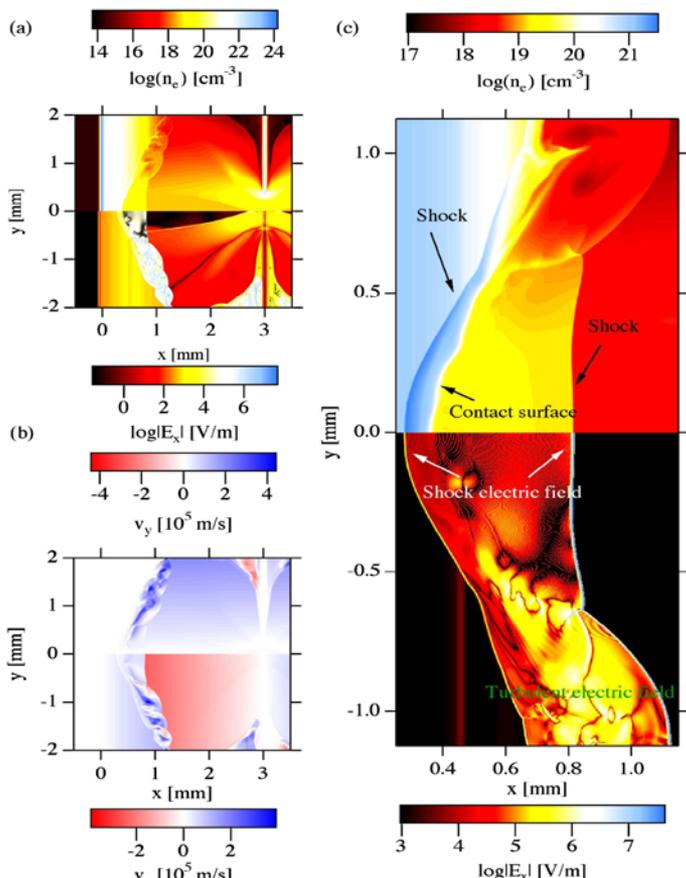
**Backlighting laser:**  
 1 ps, 1w,  
 80 J, d = 5 μm,  
 $I = 10^{19} \text{ W/cm}^2$

**Collisionless interaction area was imaged by proton radiography with ~ 4 MeV protons**

# Обнаружение и изучение вихревых неоднородностей Кельвина-Гельмгольца в лазерной плазме, возникающих при безстолкновительном взаимодействии плазменных потоков и образовании плазменных ударных волн

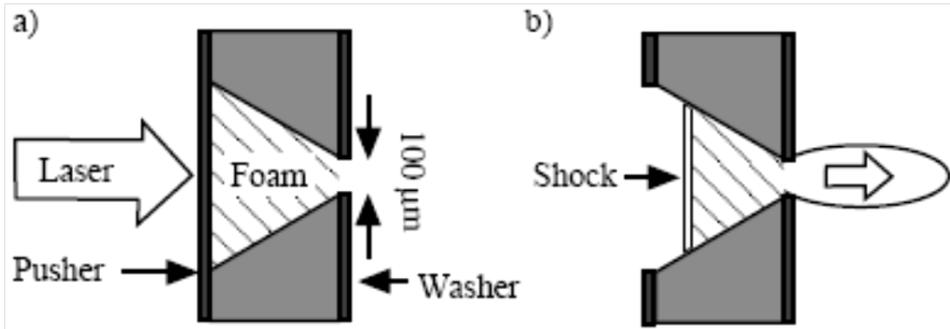


Напряженность электрического поля в 10 МВ/м получена по данным протонной радиографии и гидродинамического моделирования



Карта электронной плотности и напряженности электрического поля в области взаимодействия.

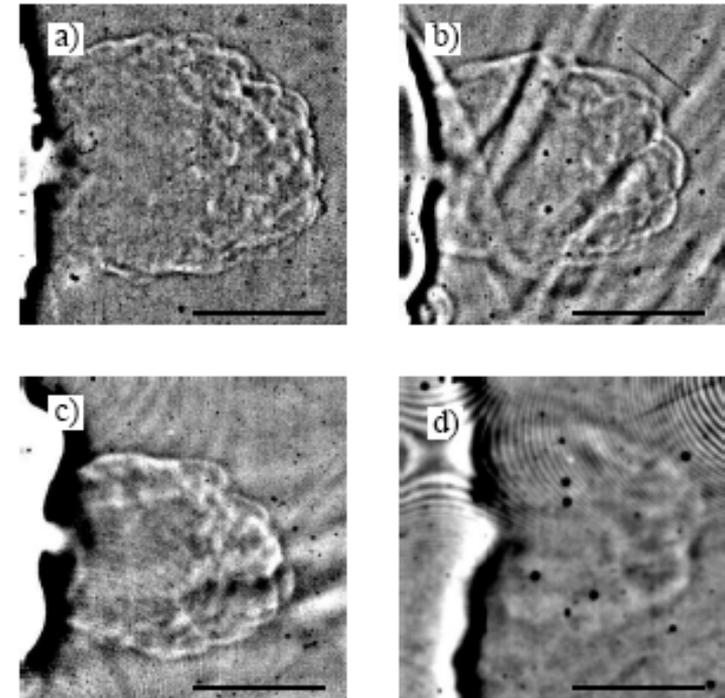
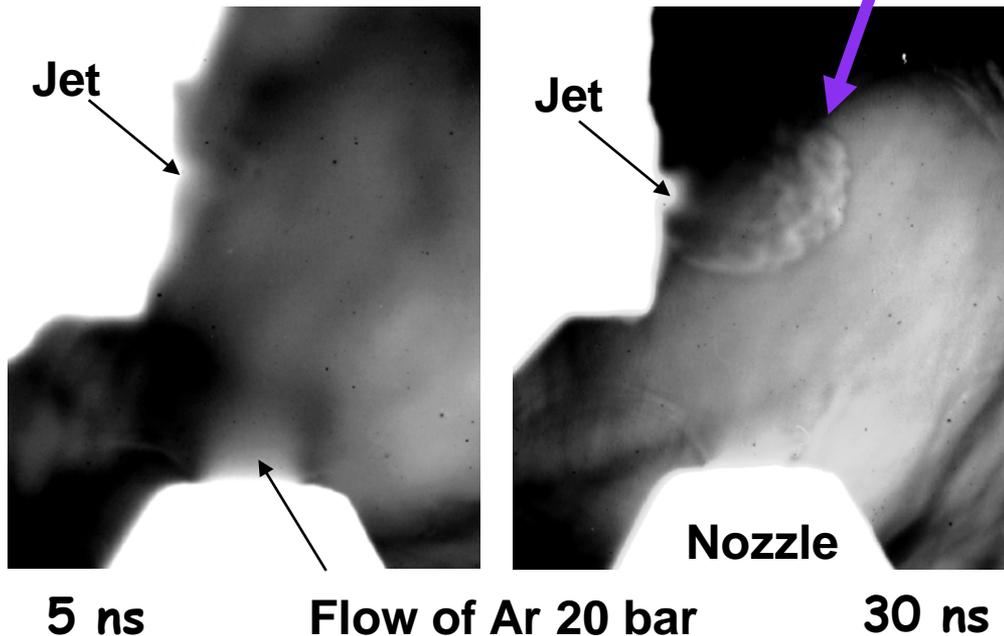
# Proton radiography for plasma jet in ambient gas



Al-CH-Ti pusher, plastic foam doped Br

Jet propagation in ambient gas

shock formation

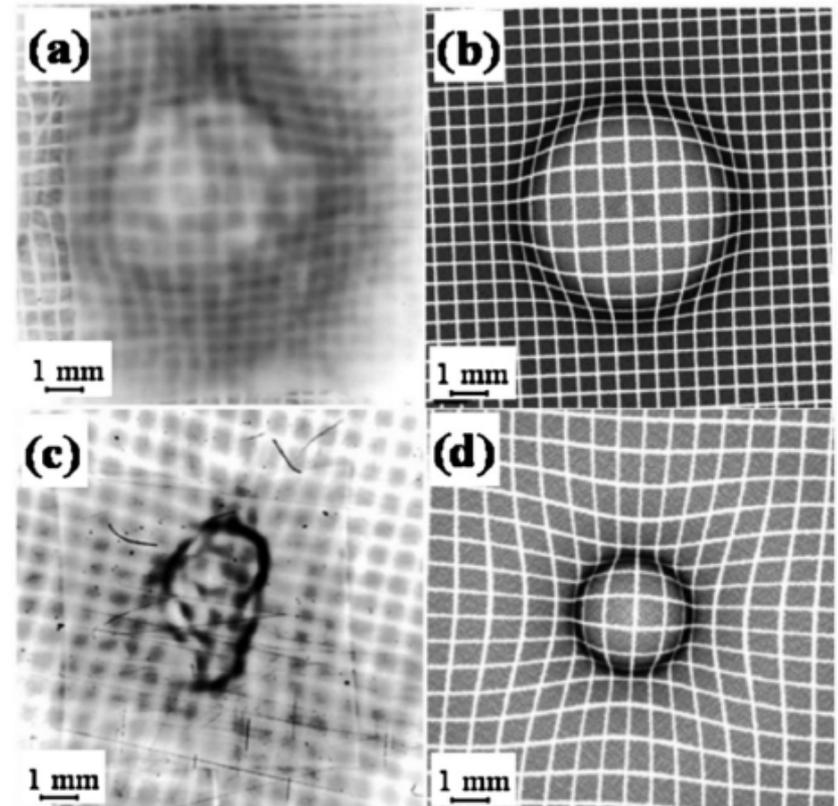
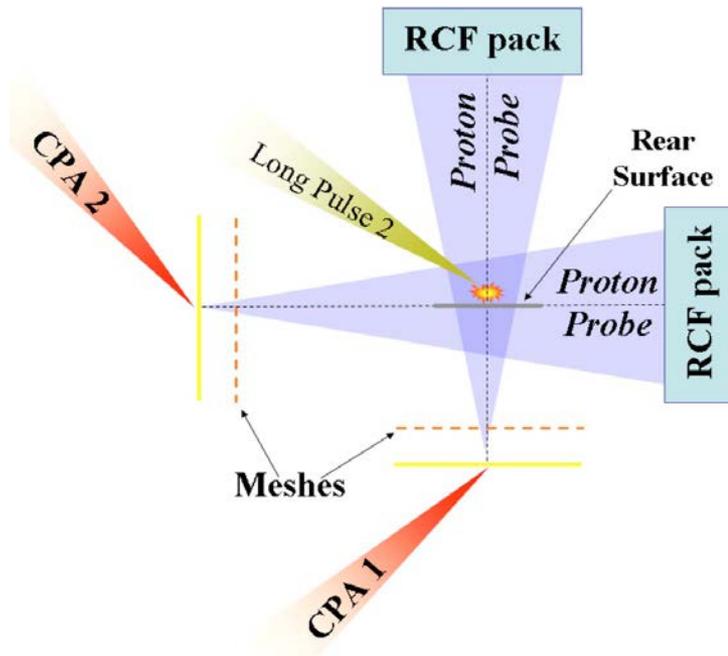


Ambient pressure was varied within 5-40 bar



# EM-field measurements by proton deflectometry

$$\frac{\delta n_p}{n_p} \approx -\frac{eL}{2\varepsilon_p M} \int_{-b/2}^{+b/2} \nabla_{\perp} \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}_p}{c} \times \mathbf{B} \right) dx,$$



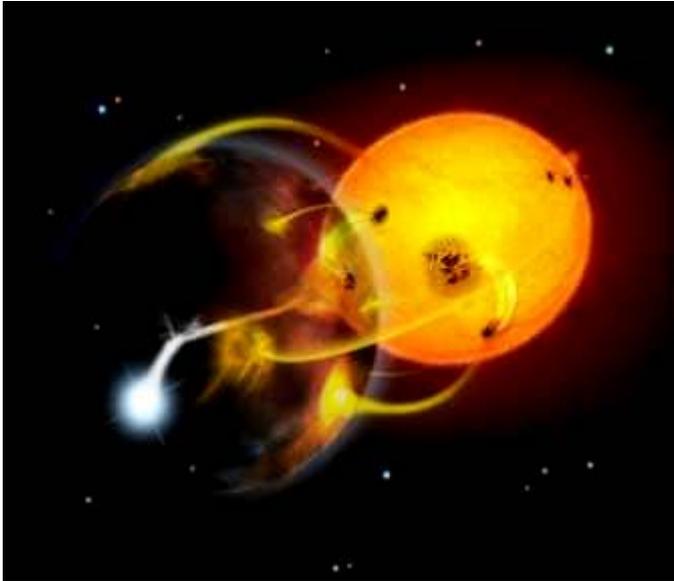
**B field of 45 T is measured  
at ns kJ laser focal spot**

# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

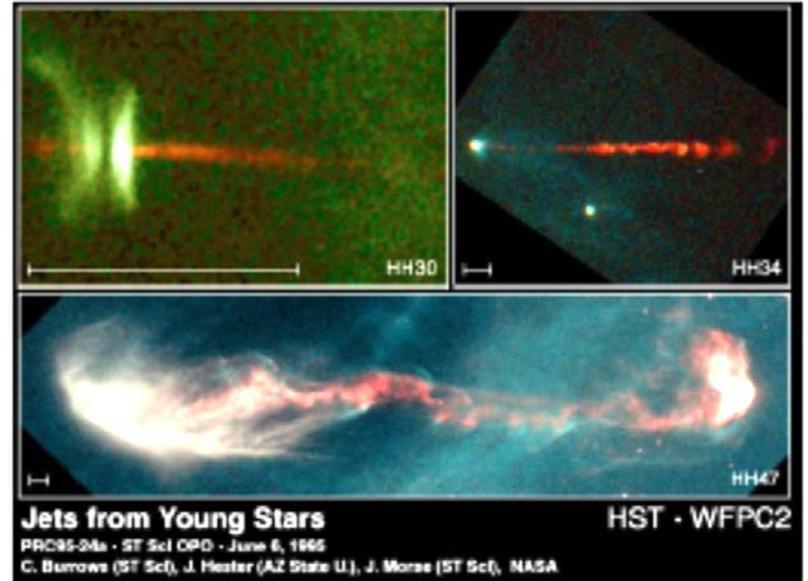
- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- **Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.**
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW

# Motivation - Modeling of astrophysical MHD processes

## Accretion in binary systems



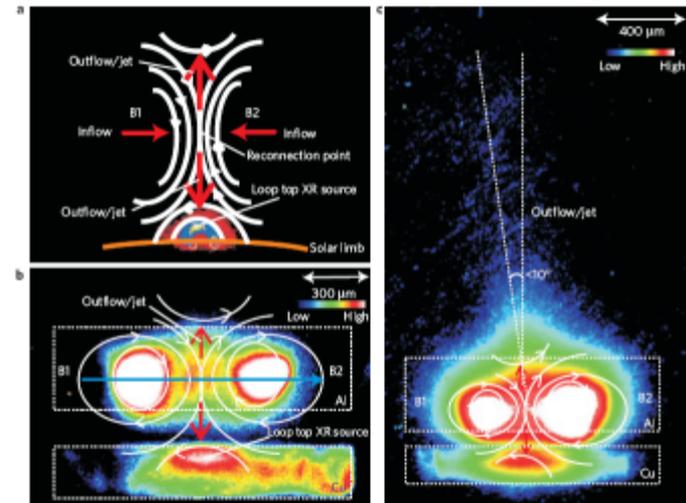
## Supersonic jets / Habris-Haro objects



## Young star formation / supernovae

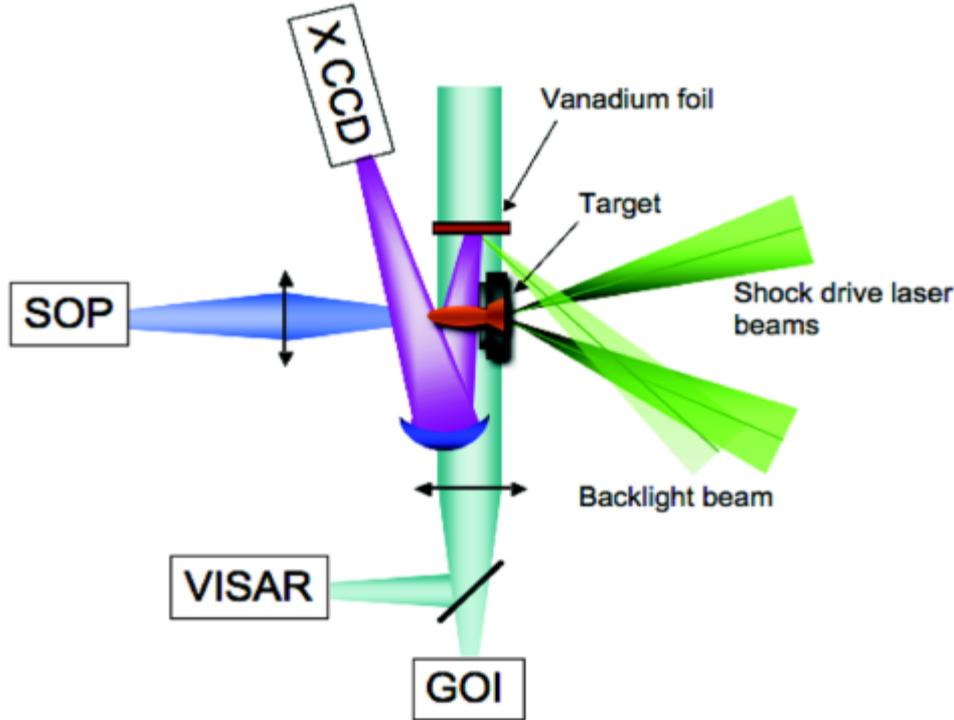


## Magnetic reconnection in a photosphere



# Radiography on supersonic plasma flows and shock waves

“Cold” plasma flows ( $T_e < 10 \text{ eV}$  range)  
from the rear “surface”



X-ray radiography 2D imaging and  
measurements on plasma ion/“bulk”  
density with ps temporal resolution

1 ns / 1 ps,  
700 J / 100 J  
d = 10  $\mu\text{m}$ ,  
I =  $10^{18} \text{ W/cm}^2$

1 ns, 2w / 1w  
300 J / 1000 J,  
d = 400  $\mu\text{m}$   
I =  $10^{14} \text{ W/cm}^2$

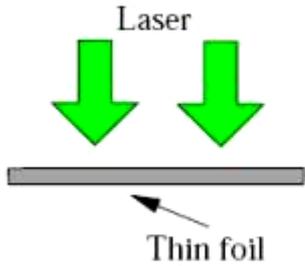


For both cases, the studies on a jet evolution can be done in presence of  
external **magnetic field, ambient gas or plasma, solid obstacle, counter-  
propagating flows** etc.

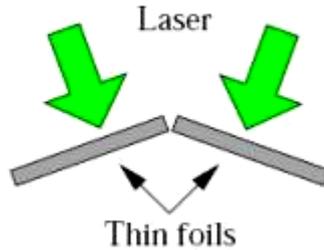
# Target design

## Plasma jets generation

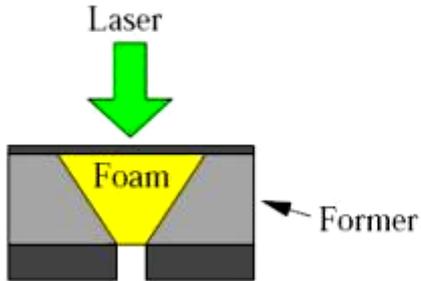
a) Plane foil



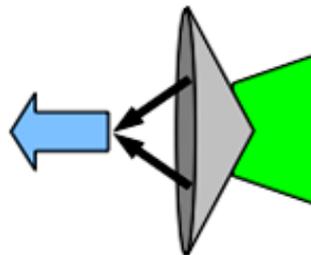
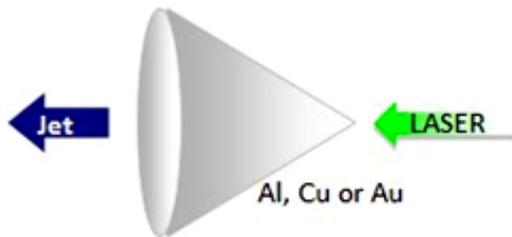
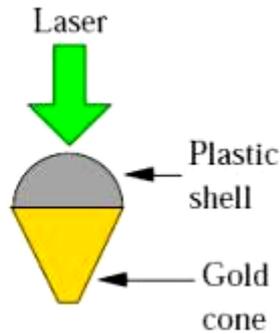
b) V-foil



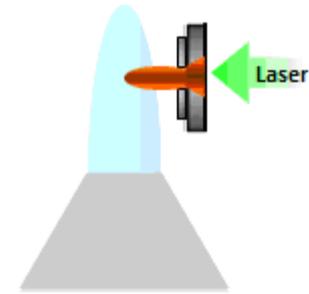
c) Foam



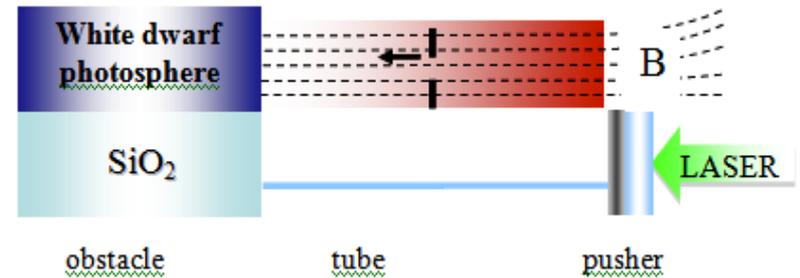
c) Cone



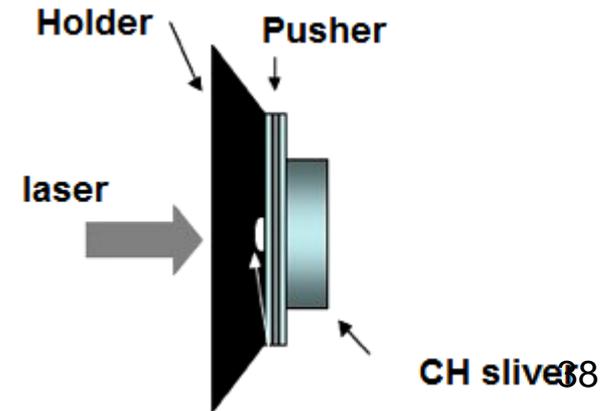
## Jet interaction with ambient media



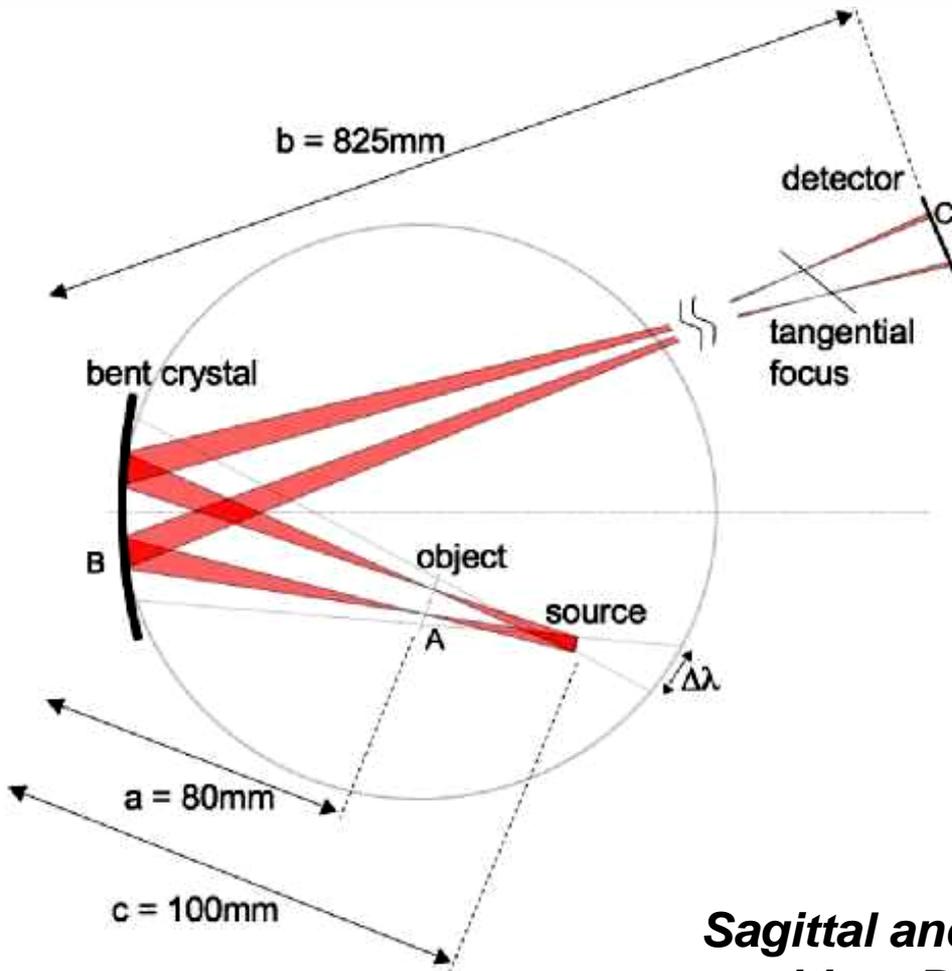
## Accretion dynamics



## Shock waves in solids



# Example of X-ray monochromatic backlighting scheme



## Features:

- Backlighter and object are inside Rowland circle  
 = High luminosity  
 = Higher spatial resolution
- Angle of radiation incidence is far from normal one  
 = Wide spectral range  
 = Spatial resolution tunable

$$f_t = \frac{aR \sin \theta}{2a - R \sin \theta}, M_t = \frac{c}{c - a} \left[ \left( \frac{2}{R \sin \theta} - \frac{1}{c} \right) b - 1 \right],$$

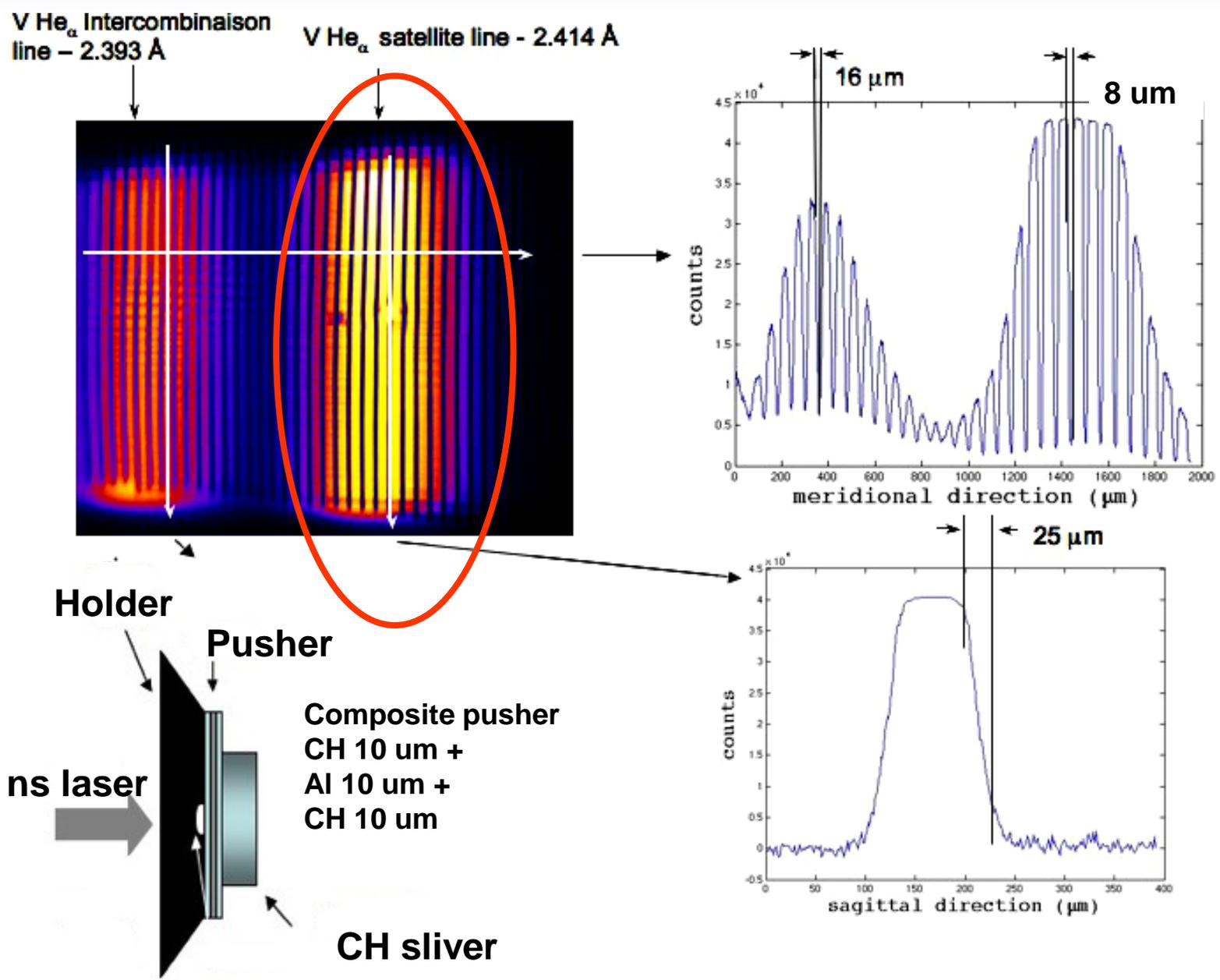
$$f_s = \frac{aR}{2a \sin \theta - R}, M_s = \frac{c}{c - a} \left[ \left( \frac{2 \sin \theta}{R} - \frac{1}{c} \right) b - 1 \right].$$

***Sagittal and tangential focuses are not on the same position. By choosing detector position the spatial resolution along each direction can be tuned up.***



Monochromatic scheme allows to measure object density or chemical staff in precise according to probe radiation absorption

# Calibration results, target design for shock waves studies

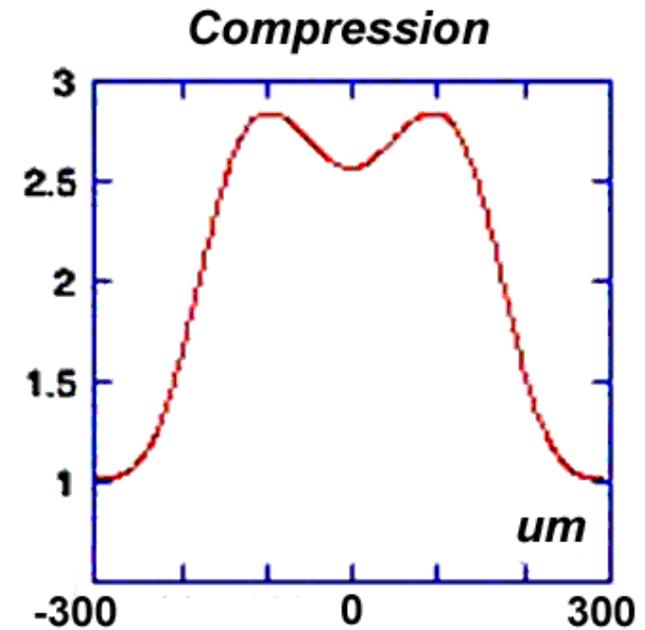
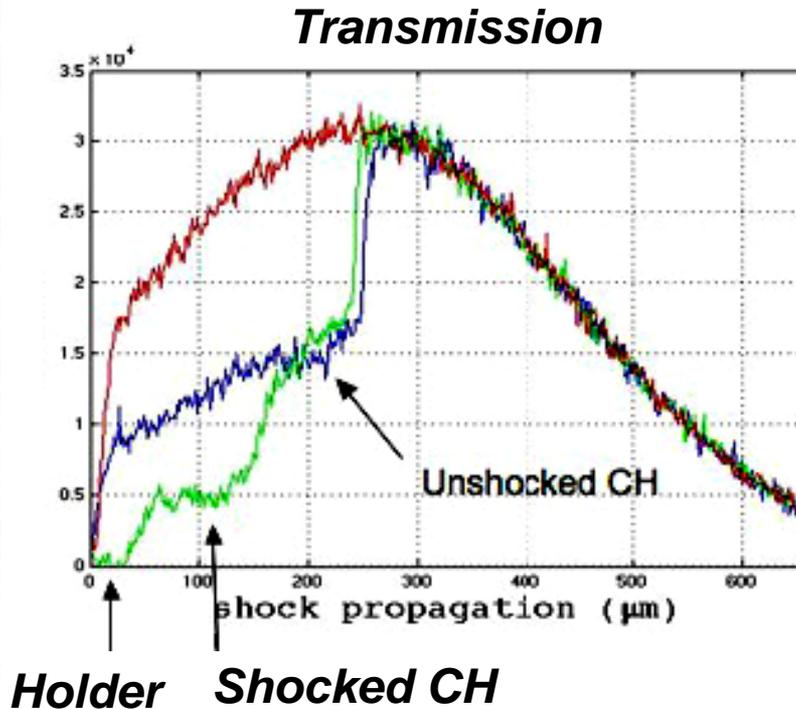
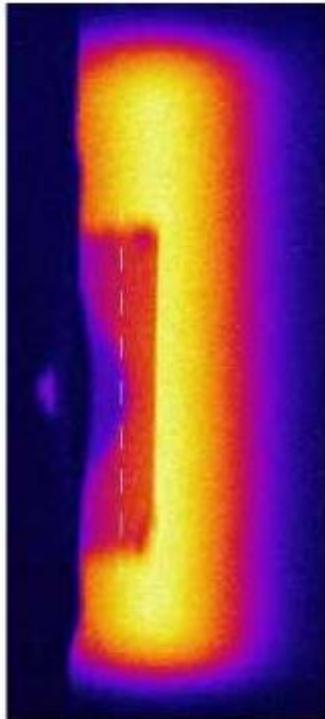


# Shock waves in laser plasma – EOS for HED

X-ray image backlighted only by V He $\alpha$  spectral line



Shock wave in CH sliver initiated by 300 J 1 ns laser



Due to spectral selectivity of backlighting image the density profile of the object can be measured in precise, with spatial resolution along shock front.

Shock front velocity of 20 km/s is measured

# Doubts in creation of capable backlighting source

~ 1 kJ in 1 ns: Bright X-ray source ~ 5 keV, few-ns time resolution  
- Monochromatic backlighting is possible, no fast electrons

OK



~ 100 J in 1 ps: Few-ps time resolution  
MeV proton radiography becomes available

pro

High hot electron yield = a huge noise in X-ray detector  
Lower X-ray photon yield = point-projection geometry only  
Radioactivation of the chamber after each full intensity

issues

## Solutions found:

$\eta_{\text{electrons}} \sim \lambda_{\text{las}}^2$ : laser conversion to  $2\omega$

“Out-of-laser-plane” backlighting geometry, “Wire-tip” targets.

Multi-material filtering of X-rays

10s ps stretching of BL laser pulse

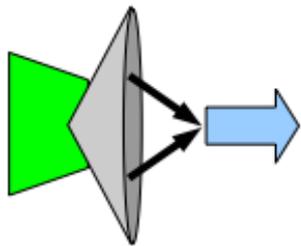
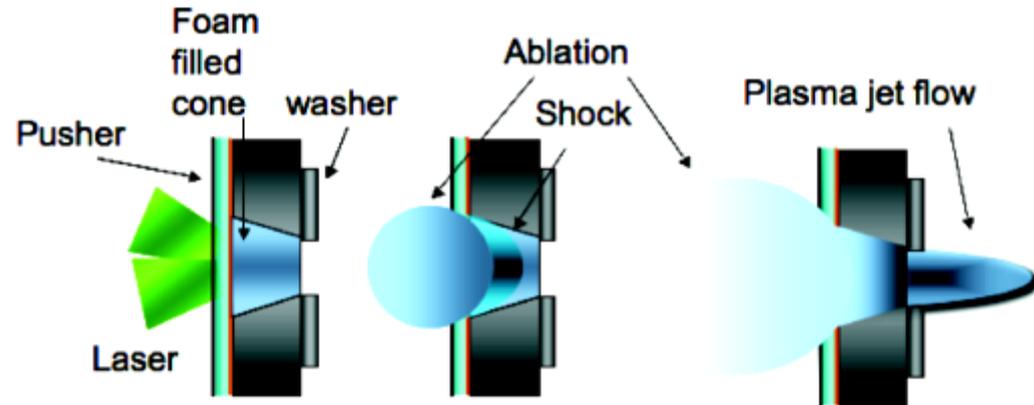
B-field protection

# Laboratory astrophysics with high power lasers

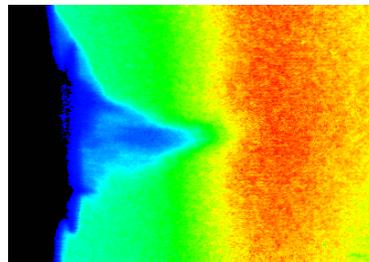
- Hydrodynamic processes in astrophysically related plasma : shock waves and supersonic jets phenomena

Scalability rules based on a set of hydrodynamic invariants derivating from Reynolds, Euler, Mach etc numbers

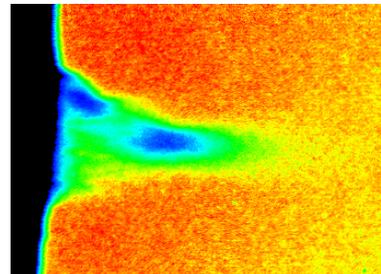
Параметр	Астрофизич. явление	Лазерная плазма
$V$ , км/с	300	100
$r$ , мм	$3E18$	1
$t_{hydro}$ , с	$3E10$	$3E-8$



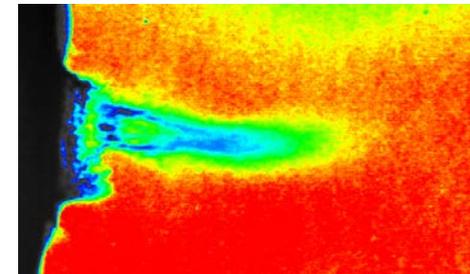
Cu cone



30 ns



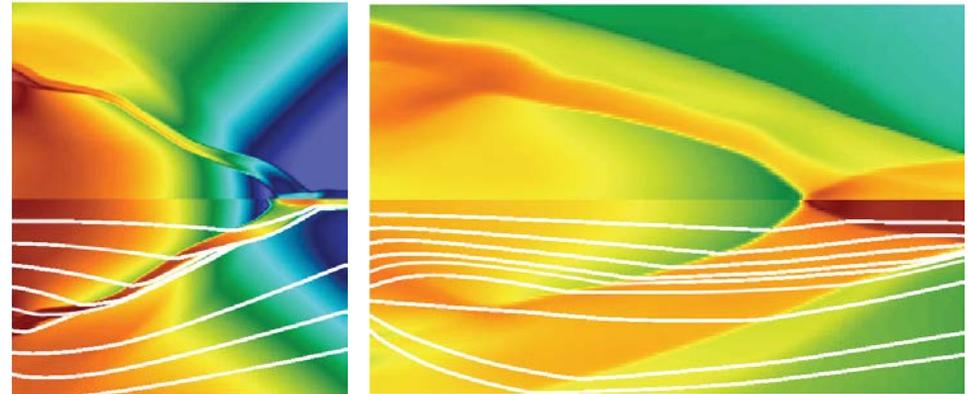
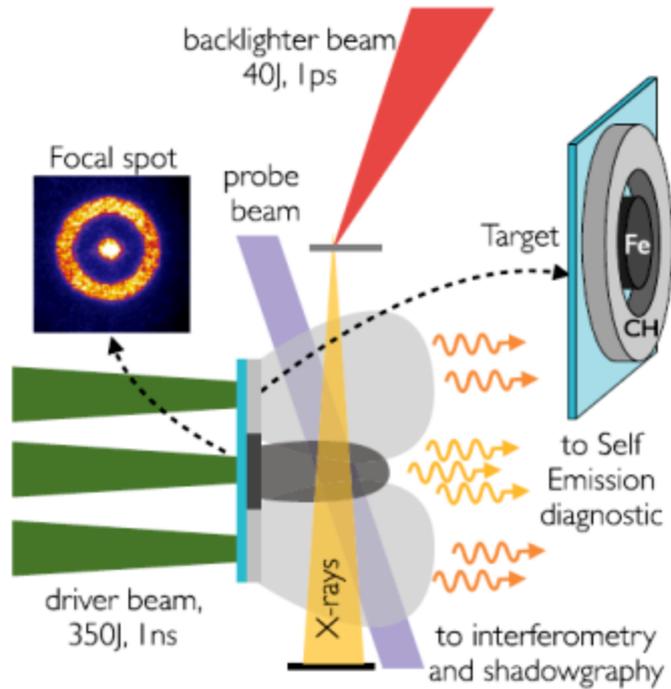
50 ns



80 ns

# Nested supersonic plasma flows

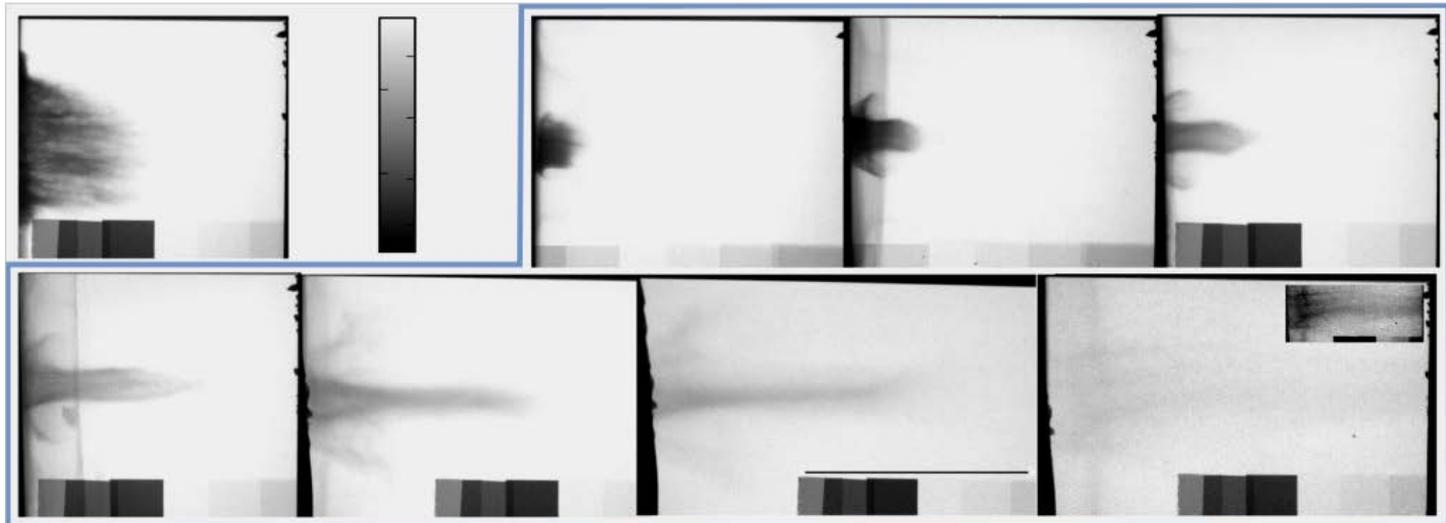
// R. Yurchak et al. *Phys.Rev.Lett.* 112, 155001 (2014)



8 ns

20 ns

*X-ray radiography data*



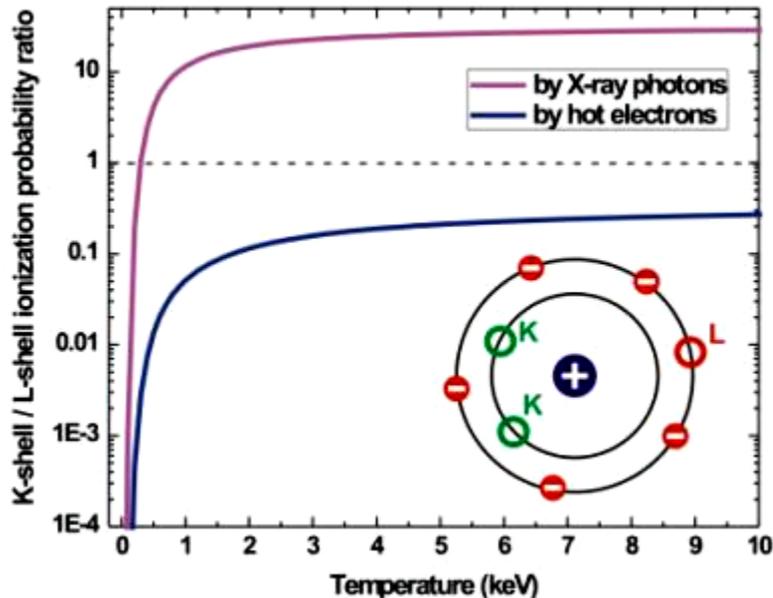
# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- **Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения**
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW

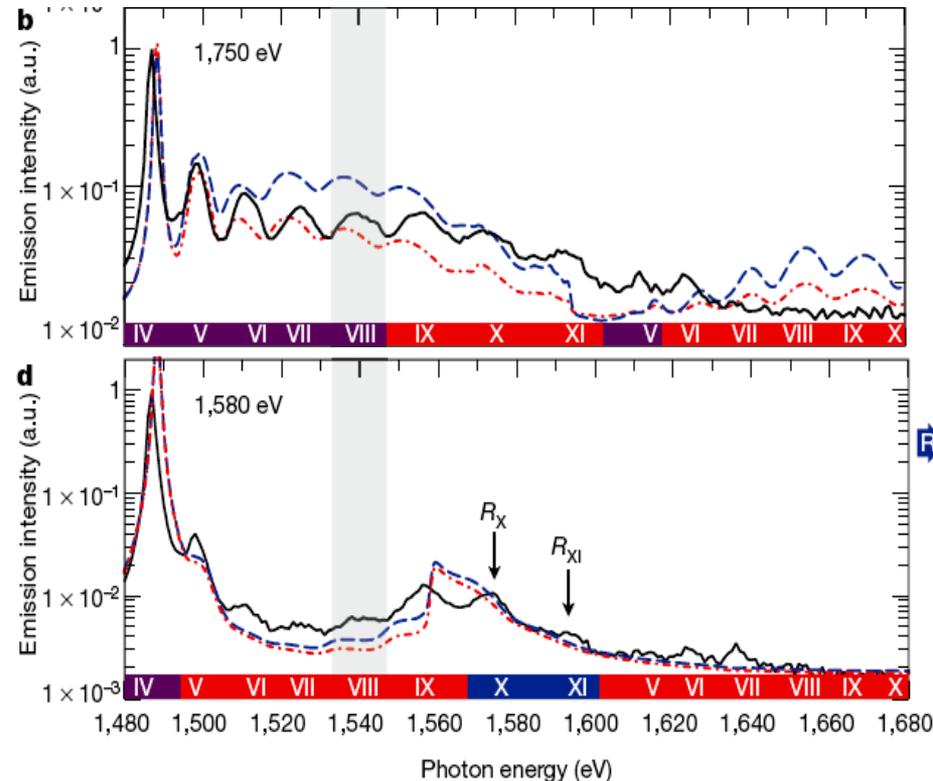
# Radiation dominated matter

Plasma physics @  
 $10^{20+}$  W/cm<sup>2</sup> laser intensities

- Relativistic laser plasma / QED
- Issues of fast electron currents in dense plasma – ICF, astrophysics
- Generation of bright X-ray source
- Intense X-rays interacting with matter
- Aim to Radiation Dominant Regime



Hollow atom spectral lines induced by intense quasi-monochromatic X-ray radiation of LCLS



// S.M. Vinko et al., Nature 482, 59 (2012)

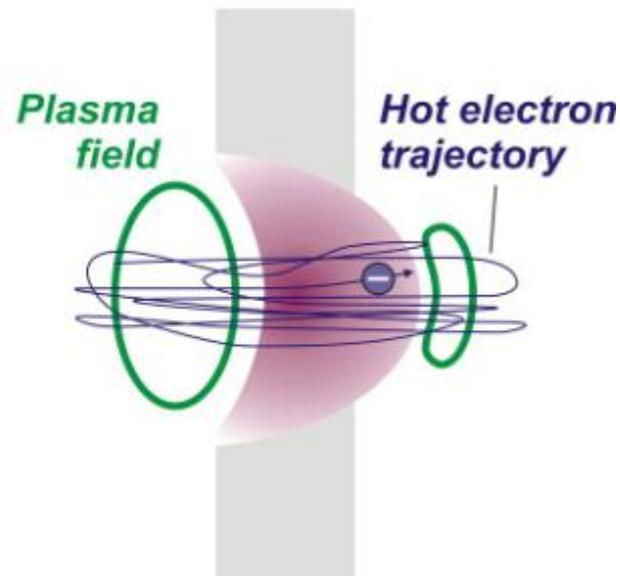
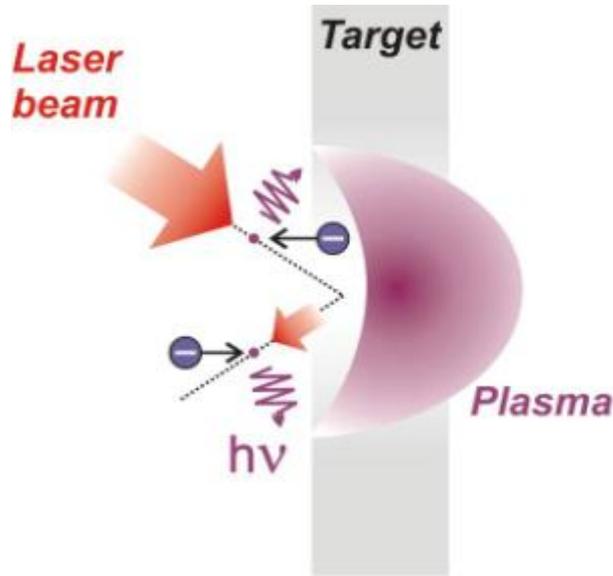
We would like to demonstrate the exotic state of matter consisting of hollow atoms is also created effectively with optical laser technology

# Ultra intense source of X-rays in keV range

$$f_R \approx \frac{2e^4}{3m^2c^5} \gamma^2 \vec{v} \left\{ \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} / c \right)^2 - \left( \vec{v} \cdot \vec{E} / c \right)^2 \right\} \quad f_R \neq 0 \text{ when E means:}$$

$E_{\text{laser}}$ , i.e. Thomson scattering  
at incident laser radiation

$E_{\text{plasma-transv}}$ , i.e. Bremsstrahlung  
in a plasma during refluxing

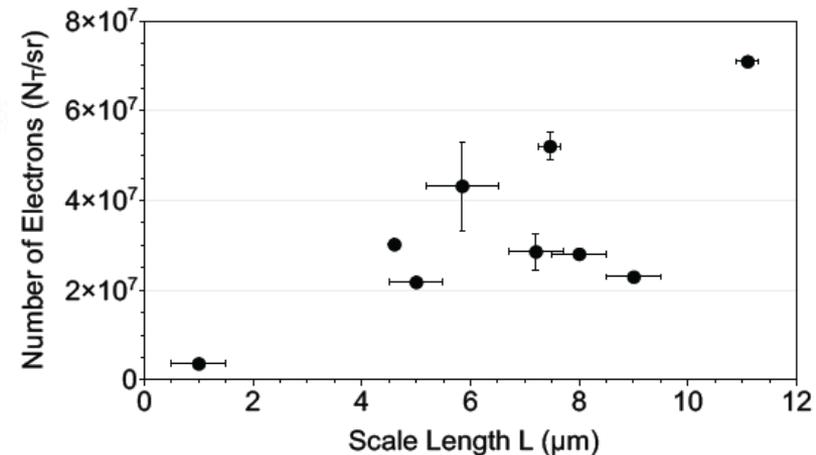
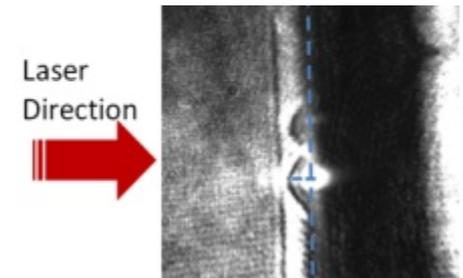
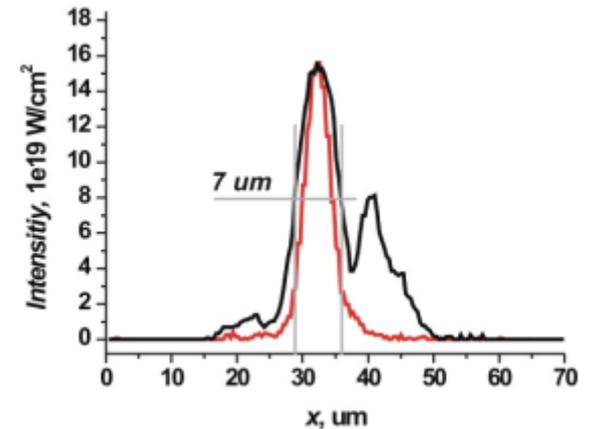
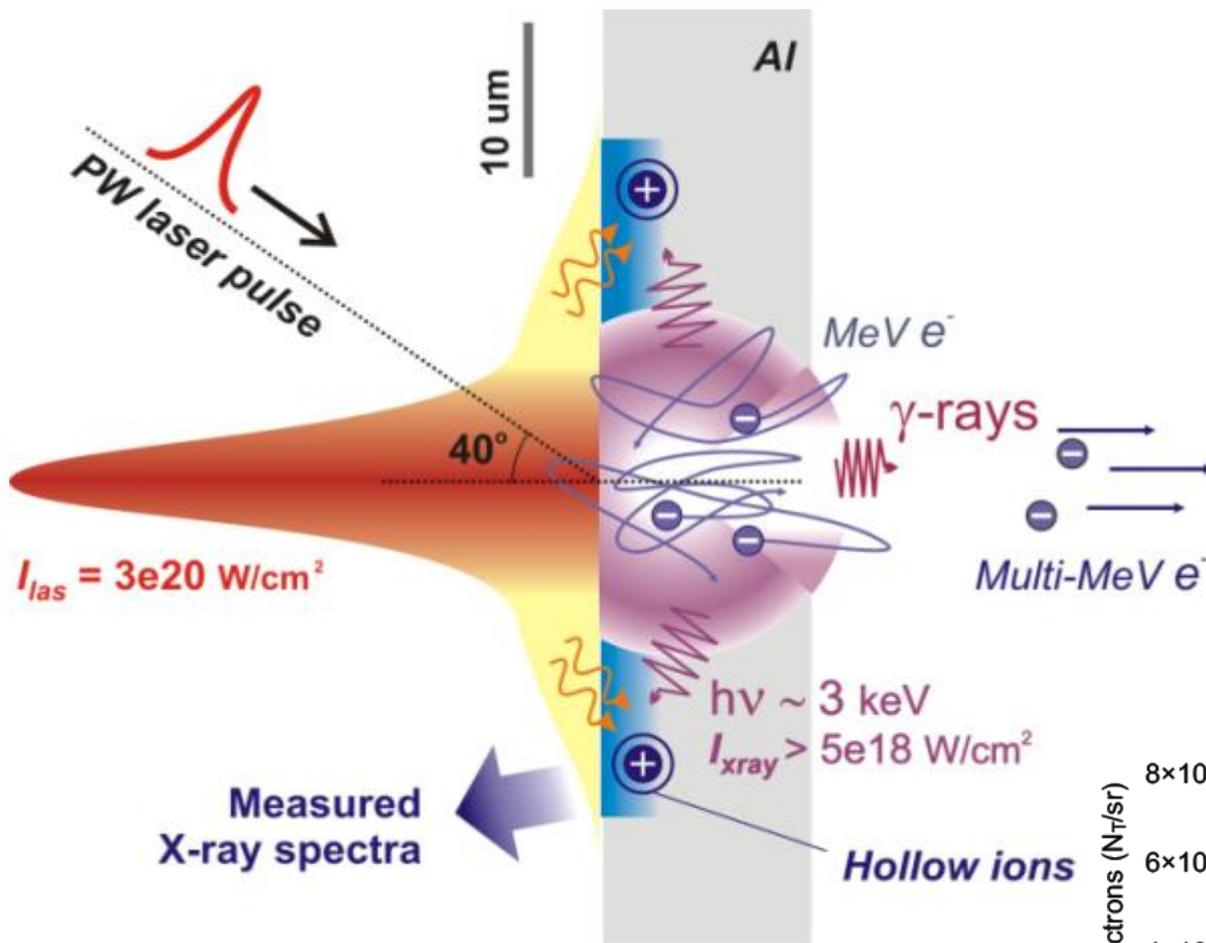


$$P \approx AN_e \int_{\varepsilon_R}^{\infty} d\gamma \gamma^{1/2} v f_R e^{-mc^2(\gamma-1)/T_h}$$

$$P \sim T_h^2 E^2 \exp(-\varepsilon(\theta/T_h))$$

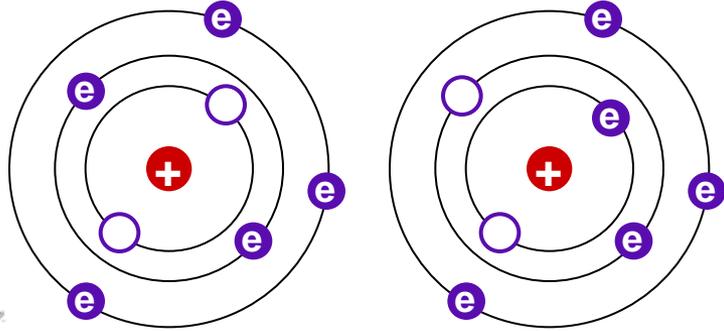
With  $I_{\text{Las}} = 3e20 \text{ W/cm}^2$        $I_{\text{Xray}} \sim 5e18 \text{ W/cm}^2$  to be estimated

# Proposed mechanism of hollow atom generation



Refluxing is very important to increase the electron flux *inside* the plasma.  
Thin ( $\sim \mu\text{m}$ ) targets is more effective due to higher electron oscillation frequency.

# Hollow atom spectroscopy, principles



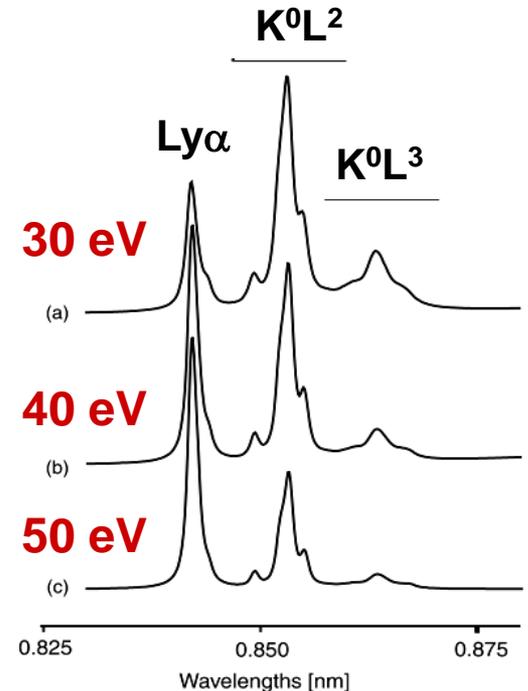
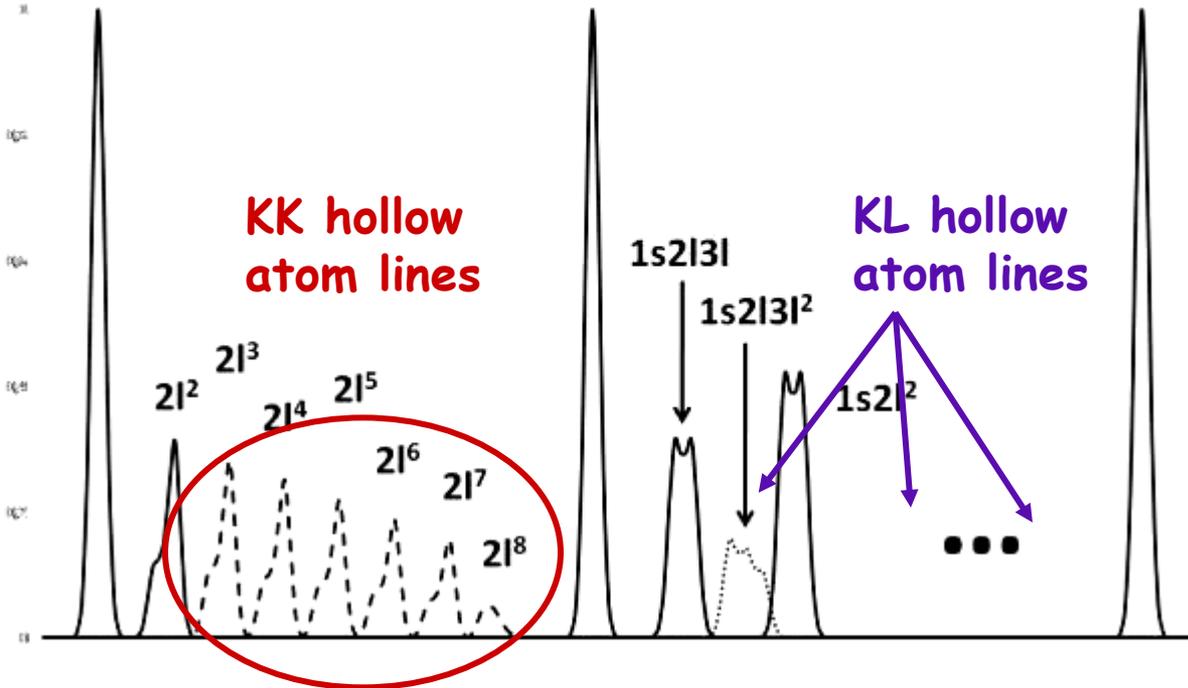
Exotic hollow atom states may be created by hot electron flow or X-ray radiation (external beam or plasma itself of)

*Target heating prior inner-shell excitation should be avoided - High contrast of a laser pulse is important*

$Ly_{\alpha}$  (2p)

$He_{\alpha}$  (1s2p)

$K_{\alpha}$  (1s2l<sup>8</sup>3l<sup>n</sup>)



**Becomes very significant for high intensity lasers**

// F.B. Rosmej et al, J.Phys.CS 72, 012007 (2007)

# Experimental setup

Laser energy – **160 J on target**

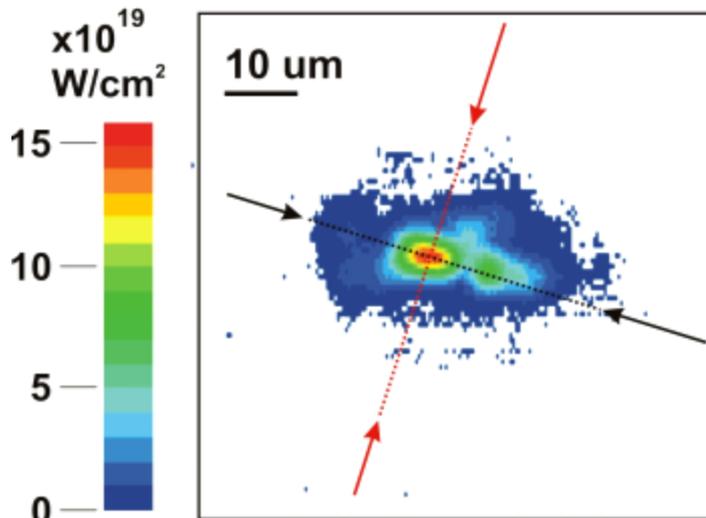
Pulse duration – 0.7 - 1.2 ps

$\lambda = 1054 \text{ nm}$

*High contrast of OPCPA*

*Vulcan PW laser*

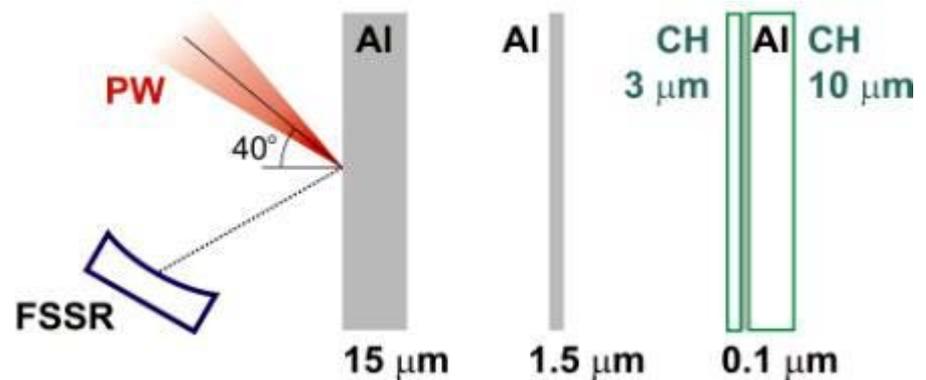
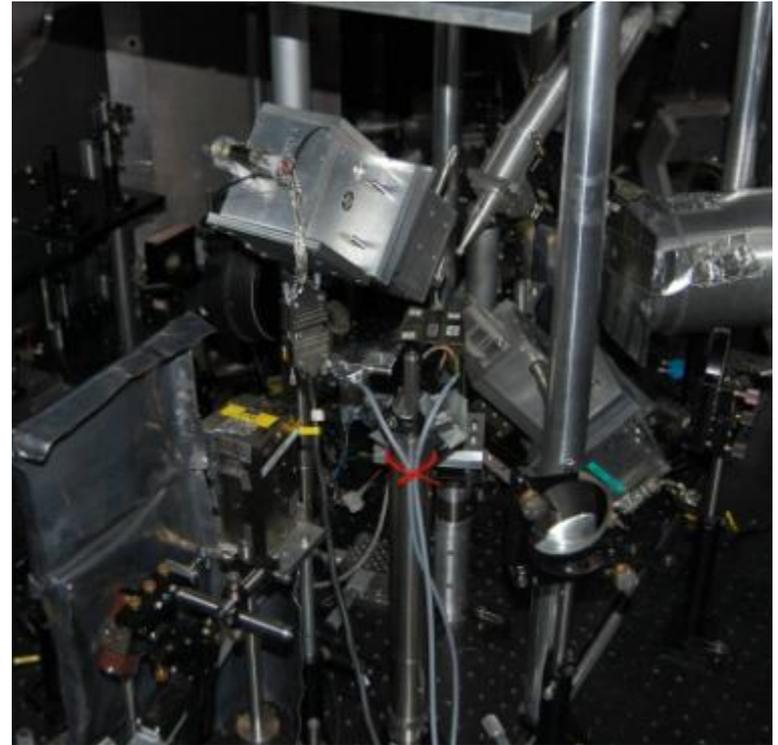
Focal spot  $d = 7 \mu\text{m}$  (30% of energy in)



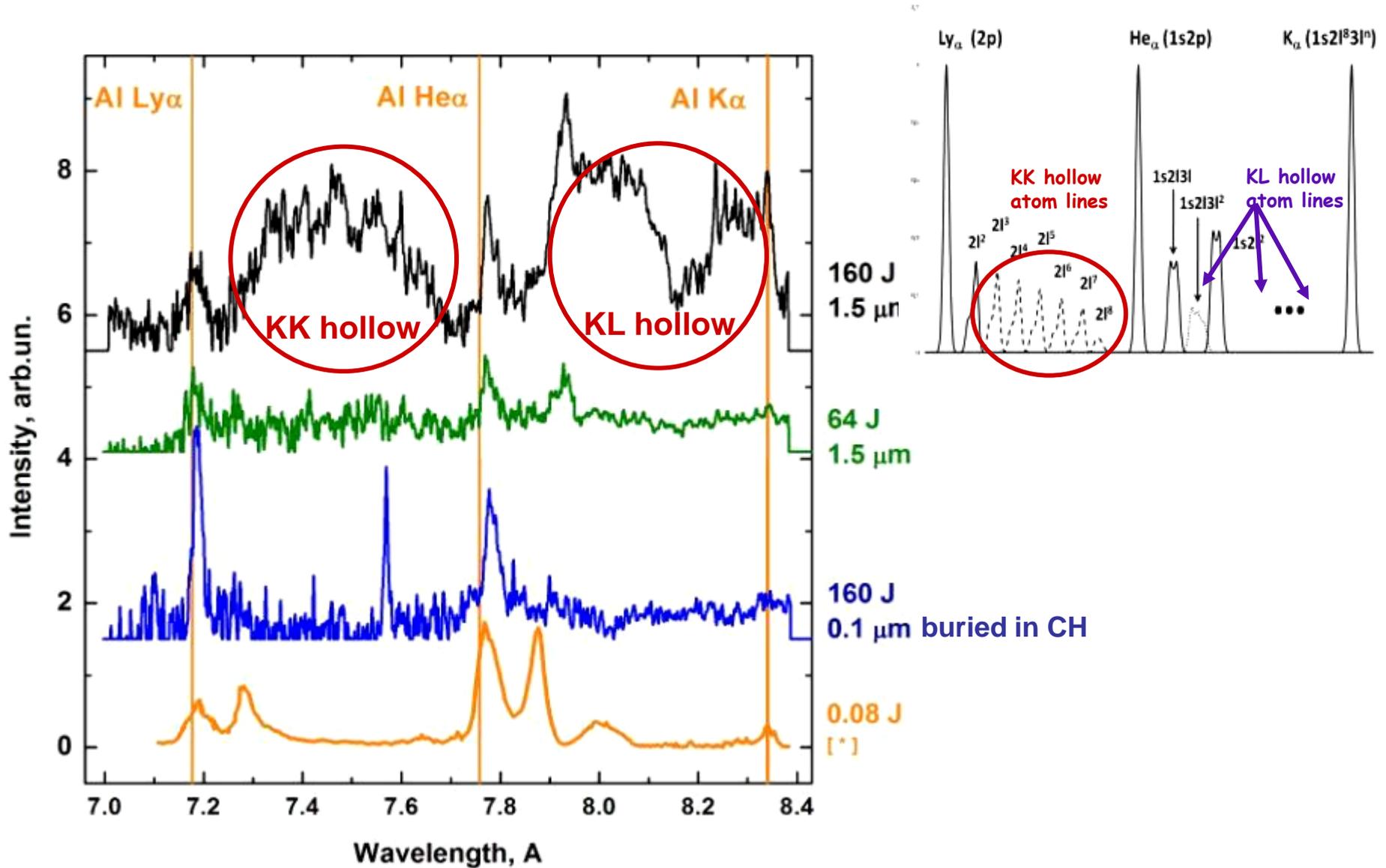
$$I_{\text{max}} = 3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$$

f/3 off-axis parabola

40 deg incidence to target normal



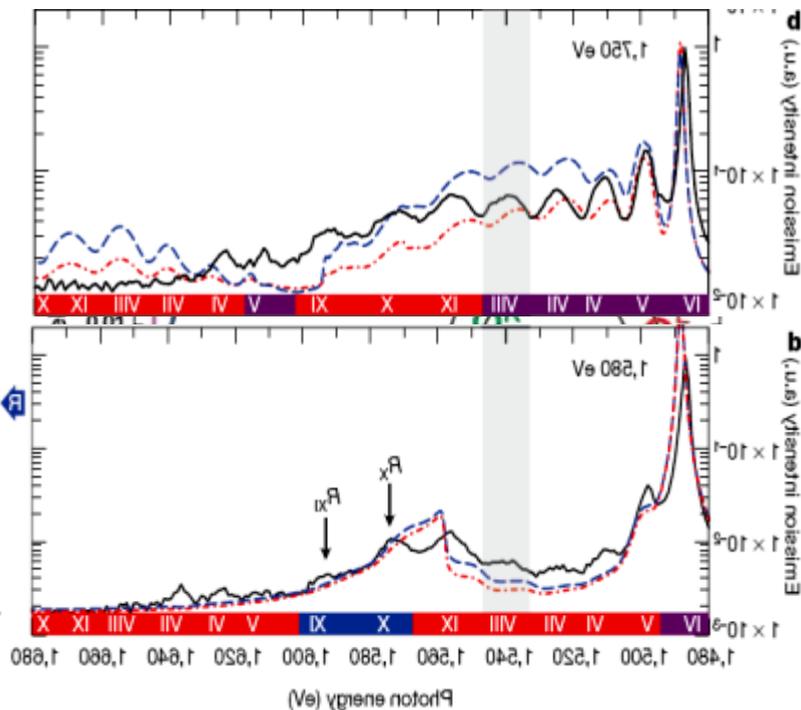
# X-ray spectroscopy measurement results



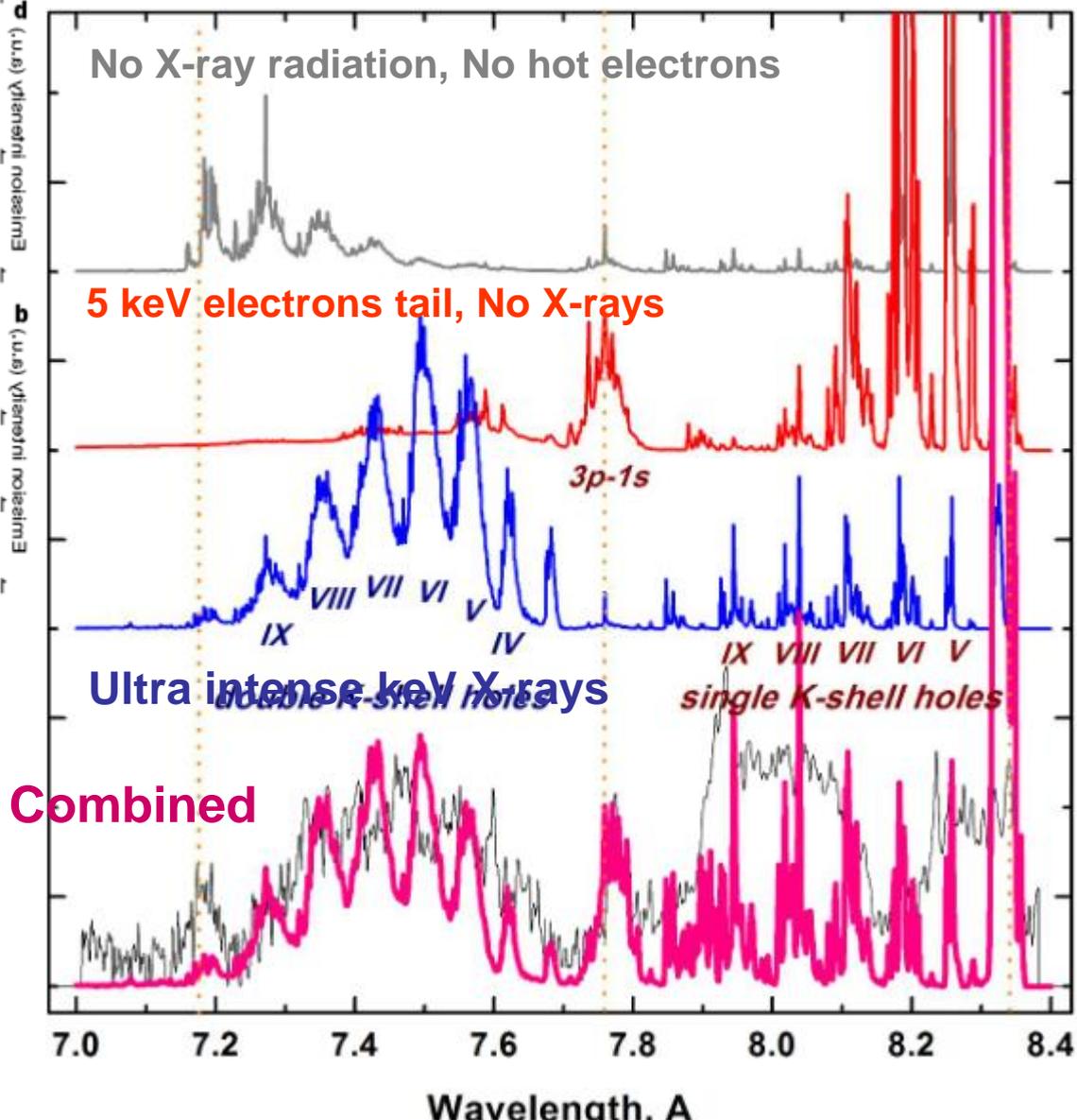
[\*] U. Andiel et al., Appl. Phys. Lett. 80, 198 (2002)

# NLTE ATOMIC spectra simulations

// J. Colgan et al. High Energy Density Physics 7, 77 (2011)



bulk  $T_e = 55 \text{ eV}$   
 $N_e = 3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$   
 5% of 5 keV electrons



No X-ray radiation, No hot electrons

5 keV electrons tail, No X-rays

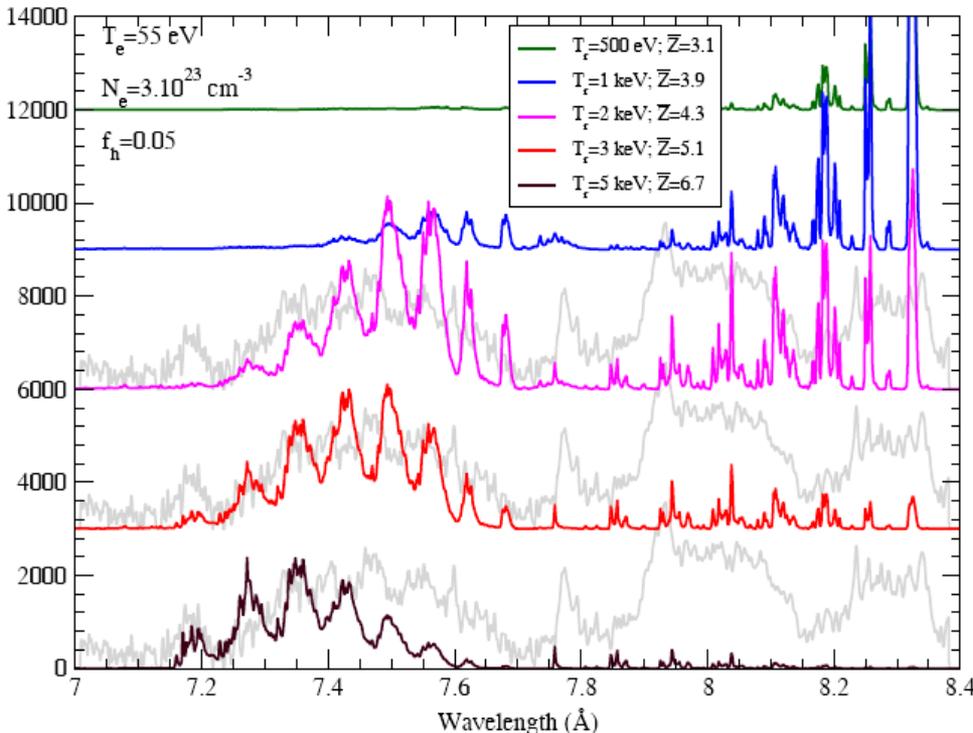
Ultra intense key X-rays

Combined

Wavelength, Å

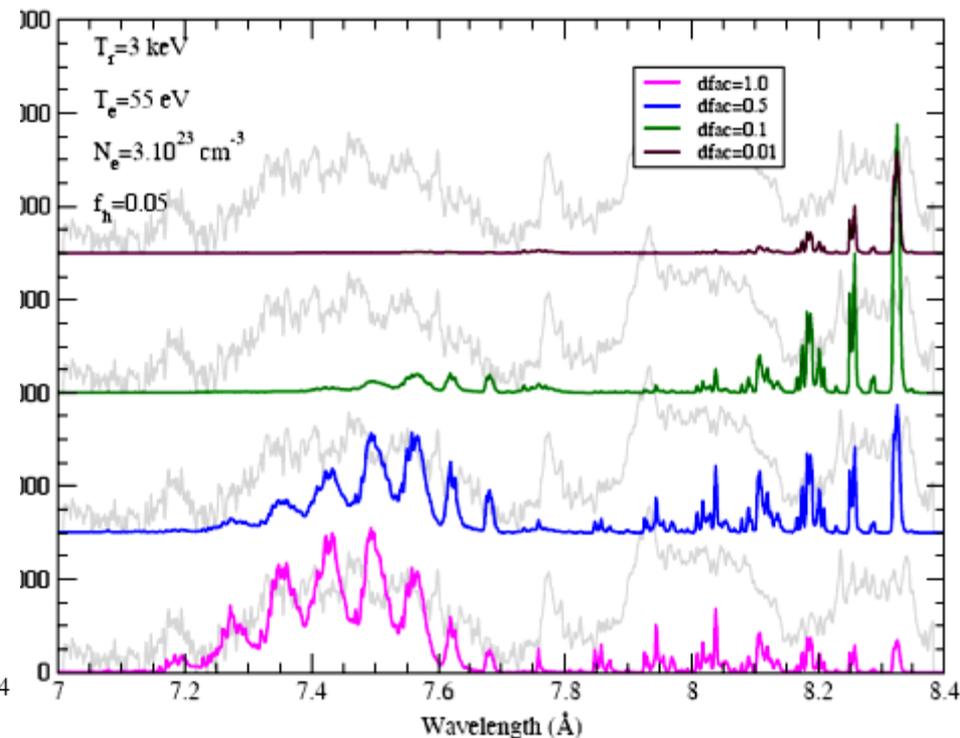
# ...depending on X-ray source parameters

## Radiation temperature



Varying  $T_{rad}$  in 0.5 – 5 keV range

## Source brightness



Testing Dilution factor in 0.01 – 1 range

**Confirms the source of  $I_{xray} > 1E18 \text{ W/cm}^2$  intensity**  
**and  $T_{rad} \sim 3 \text{ keV}$  existing**

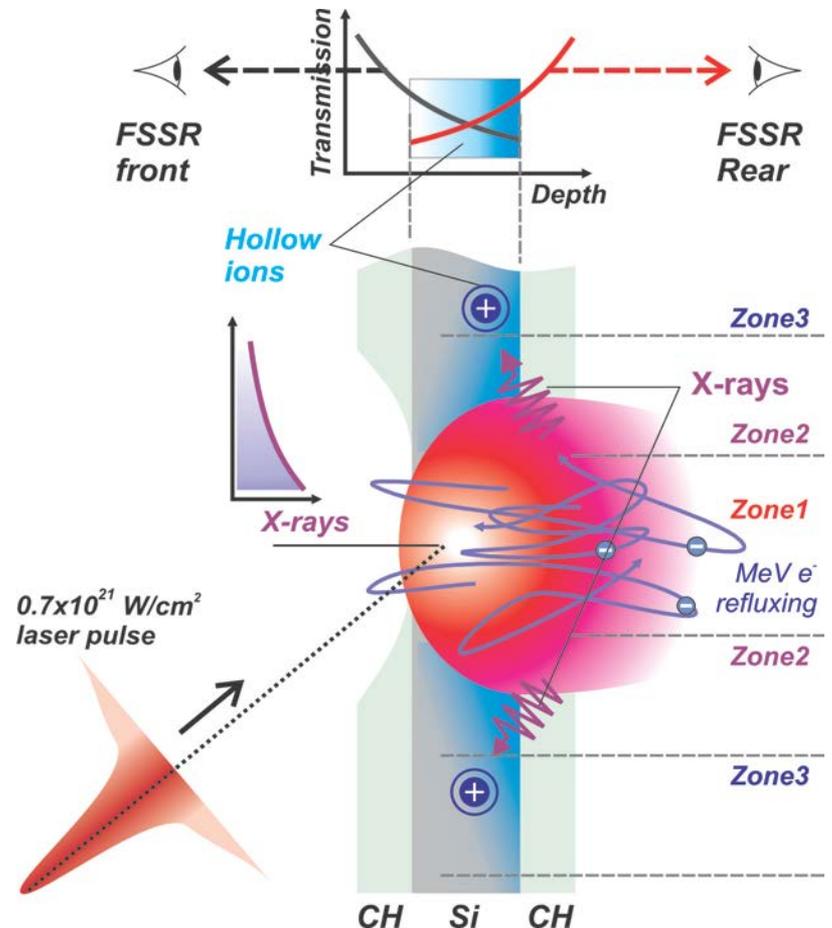
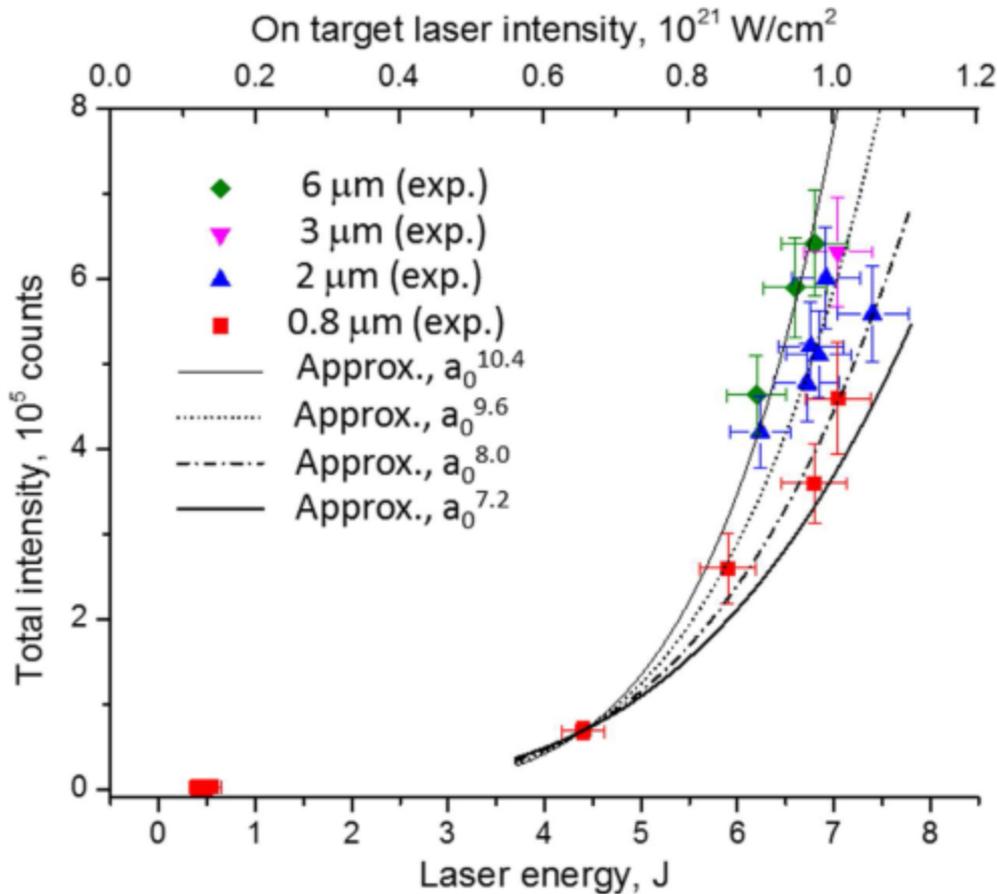
// J. Colgan et al. Phys.Rev.Lett. 110, 125001 (2013),

// S.A. Pikuz et al. HEDP 9, 560 (2013)

# Proofing of non-linear increase in X-ray yield

J-KAREN exp:

~7 J, 35 fs,  $1e21$  W/cm<sup>2</sup>



The nature of intense X-ray generation in PW laser plasma is confirmed

3-Zones concept is developed to describe the details of X-ray emission and RDKR matter creation

# RDKR with optical PW

- **Very intense spectral lines of true hollow atom** X-ray radiation are observed in the plasma of PW optical laser pulses coupled into solid Al targets.
- Spectra data simulation demonstrates the dominant role of **keV X-rays** in plasma ionization.
- The optical laser plasma is considered as **ultrabright (up to  $1e19$  W/cm<sup>2</sup>) polychromatic source of keV X-rays**. Some mechanisms of X-ray generation and hollow atom formation are proposed as a first approach.
- The observed effect is quite sensitive to laser intensity, pulse contrast and **target parameters**. It provides a nice opportunity to study the processes in **Radiation Dominated plasma** with **PW optical lasers**, complementing XFEL experiments.

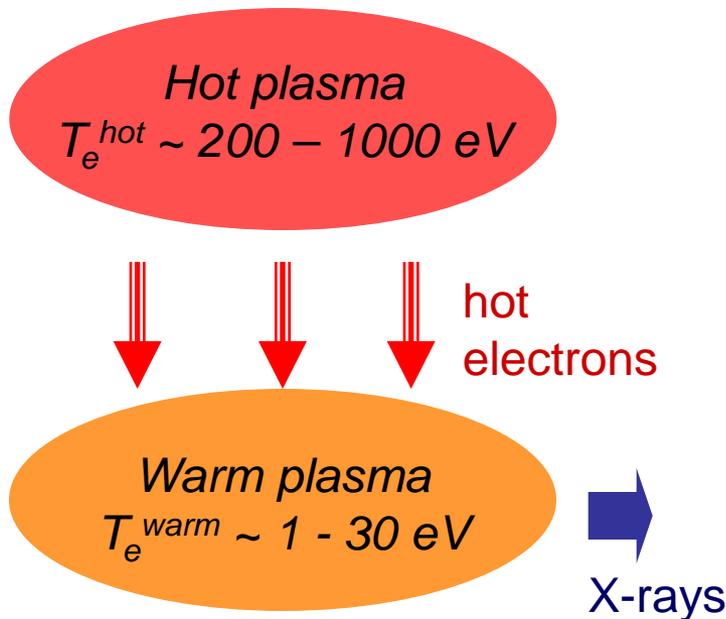
# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- **Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter**
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW

# WDM studies using optical lasers - principle and setup

Hot plasma ( $T_e \sim 1$  keV), commonly in laser focus

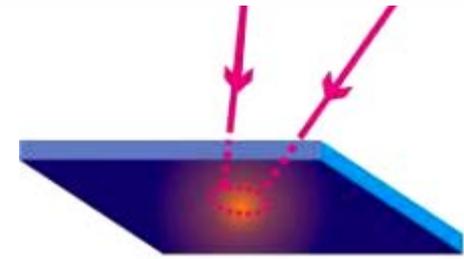
WDM – ( $T_e \sim 10$ - $100$  eV,  $N_e \sim 10^{23}$  cm $^{-3}$ )



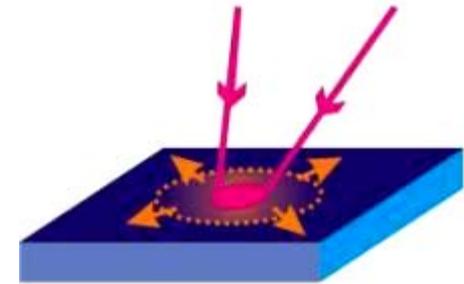
By means of X-ray spectroscopy

$T_e^{warm}$  can be determined.

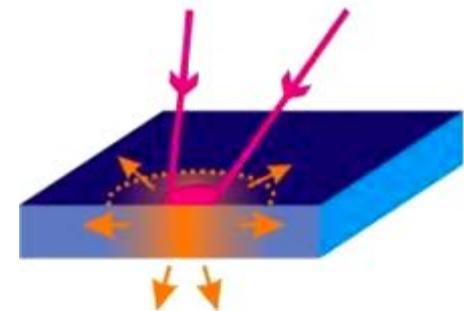
Spatial resolution is of crucial importance.



rear side of thin foil



vicinity of hot plasma at front side



along electron trajectory deep into the target

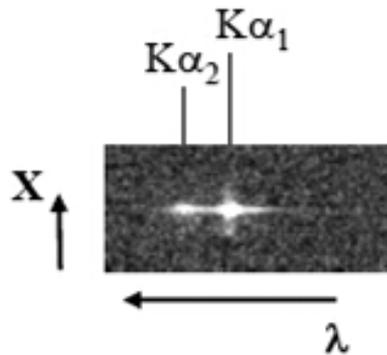
# Inner-shell $K\alpha$ of solid Ti, $T_e = 1 - 20$ eV

Laser energy – 1-6 J on target

Pulse duration – 0.5 ps

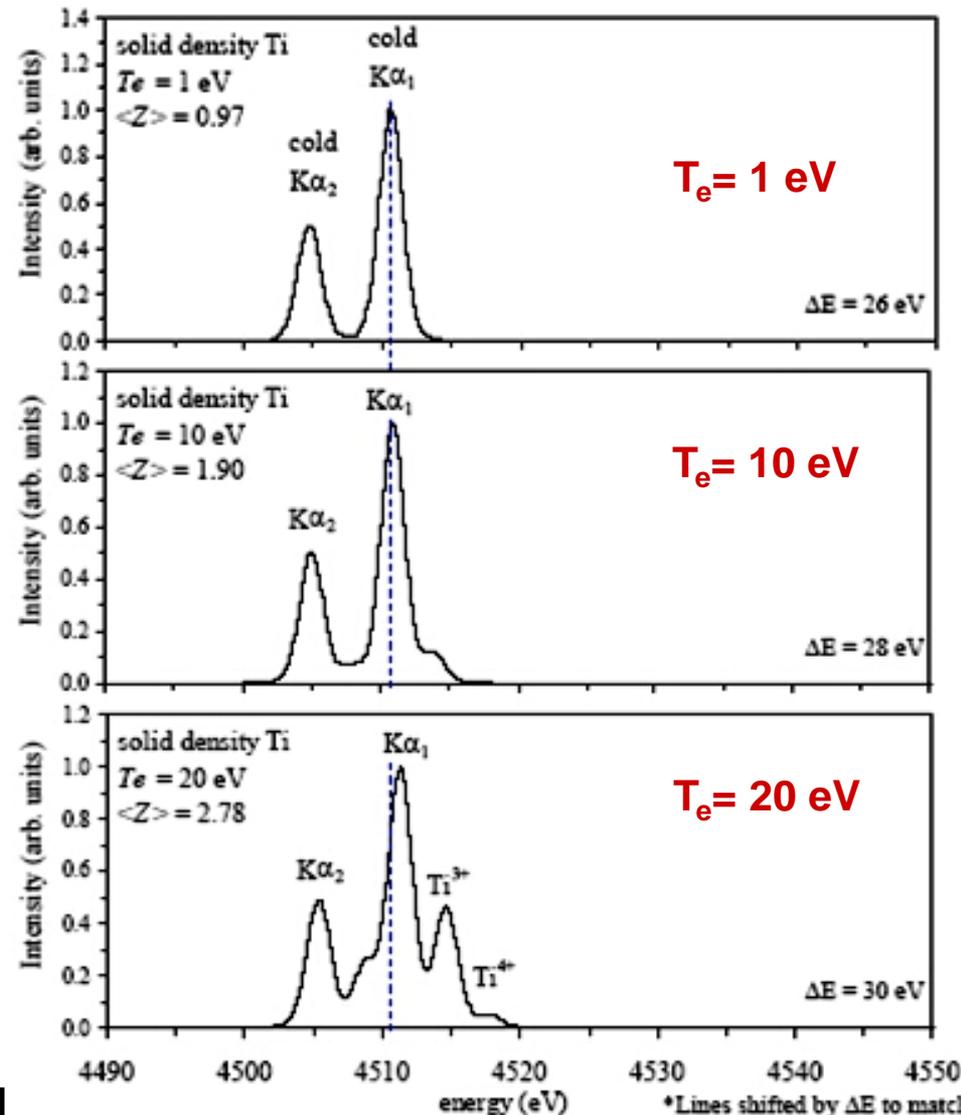
$I_{\max} = 1 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>

Target – Ti foils 2-50  $\mu\text{m}$



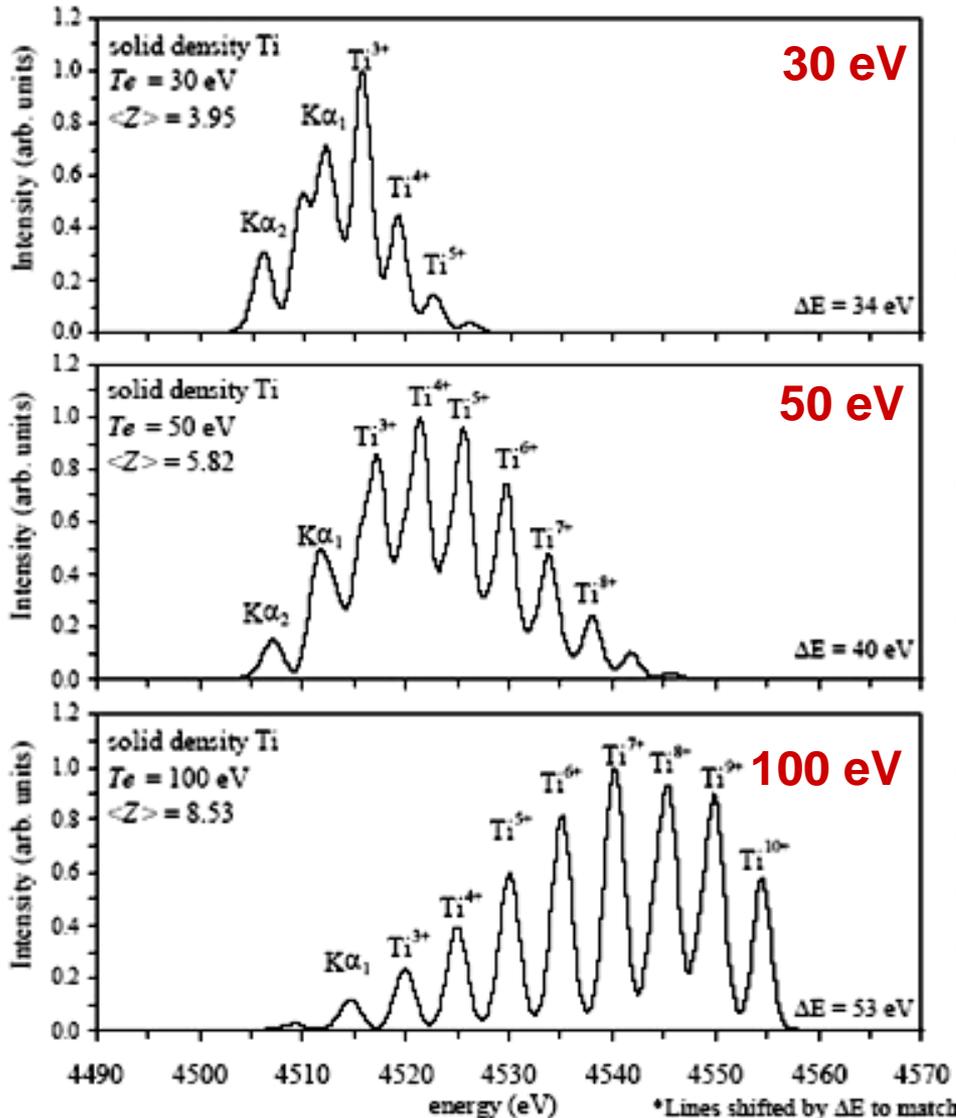
FSSR  $\delta\lambda/\lambda \sim 4000$  was provided in the vicinity of Ti  $K\alpha$

As the temperature of the solid increases, ionizing the Ti atoms the characteristic K-shell lines shift to higher energies. Removing the 4s electrons produces a shift of only  $\sim 1$  eV, while removing M-shell (3) electrons produces a  $\sim 4$  eV shift.

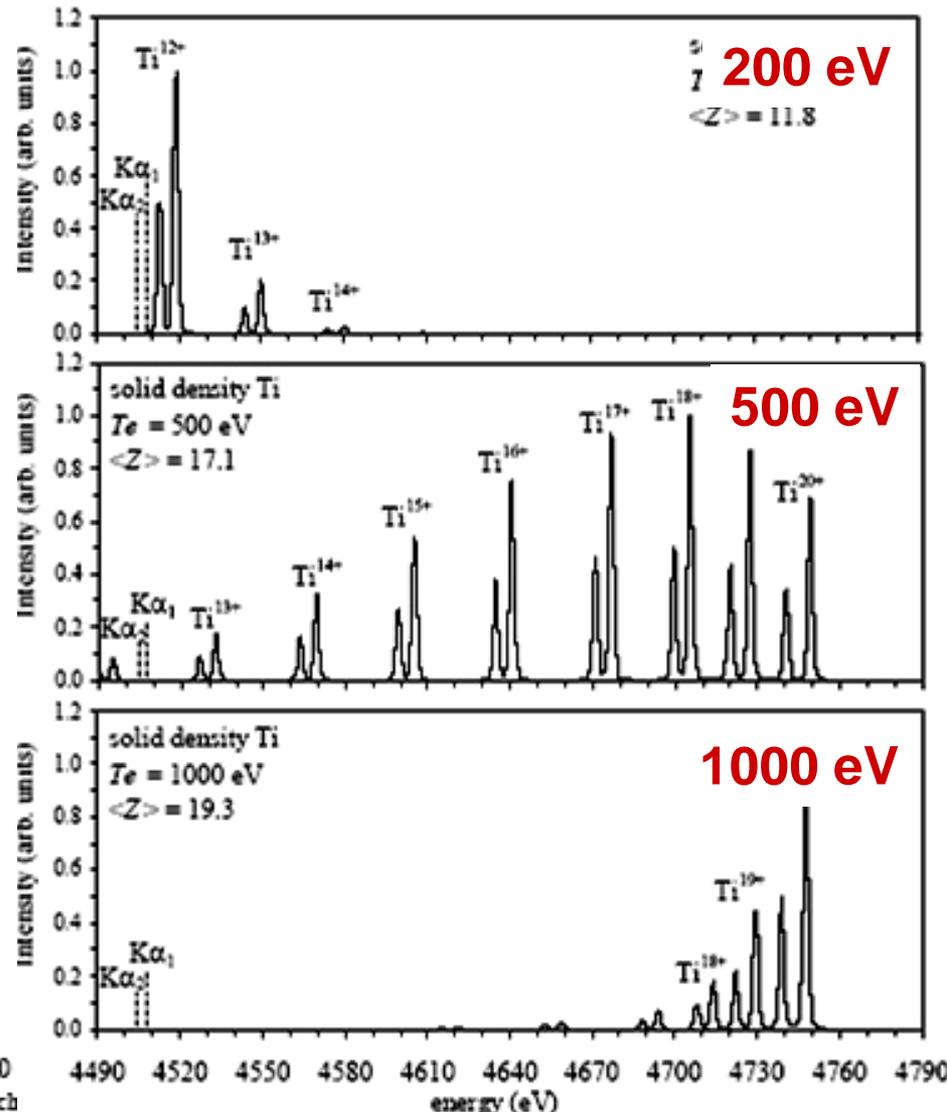


# Inner-shell $K\alpha$ of solid Ti, $T_e = 50 - 1000$ eV

## Further M-shell ionization



## L-shell ionization turns on

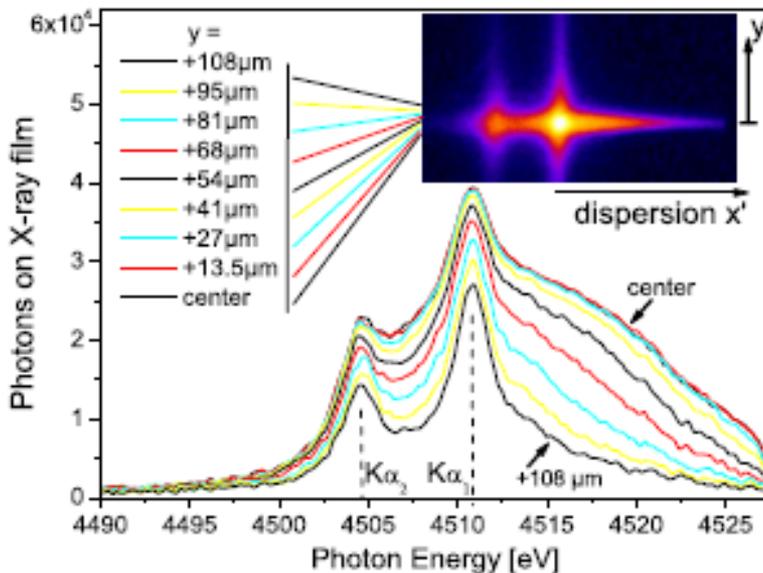
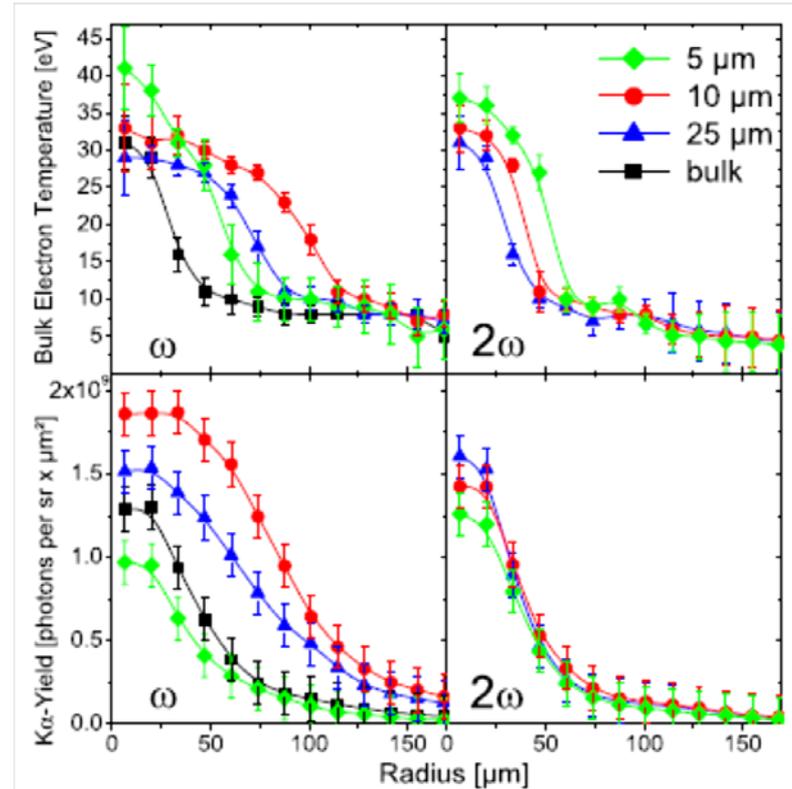
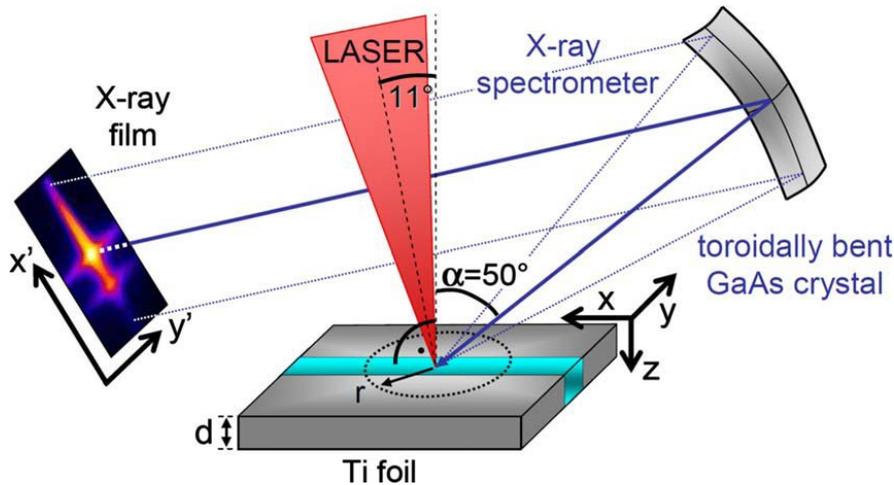


# Previous observations

WDM at the front side of laser irradiated bulk solids, in the vicinity of focal spot

// U. Zastrau et al. PRE 81, 026406 (2010)

0.35 ps, 15 J,  $I \sim 5e19$  W/cm<sup>2</sup>

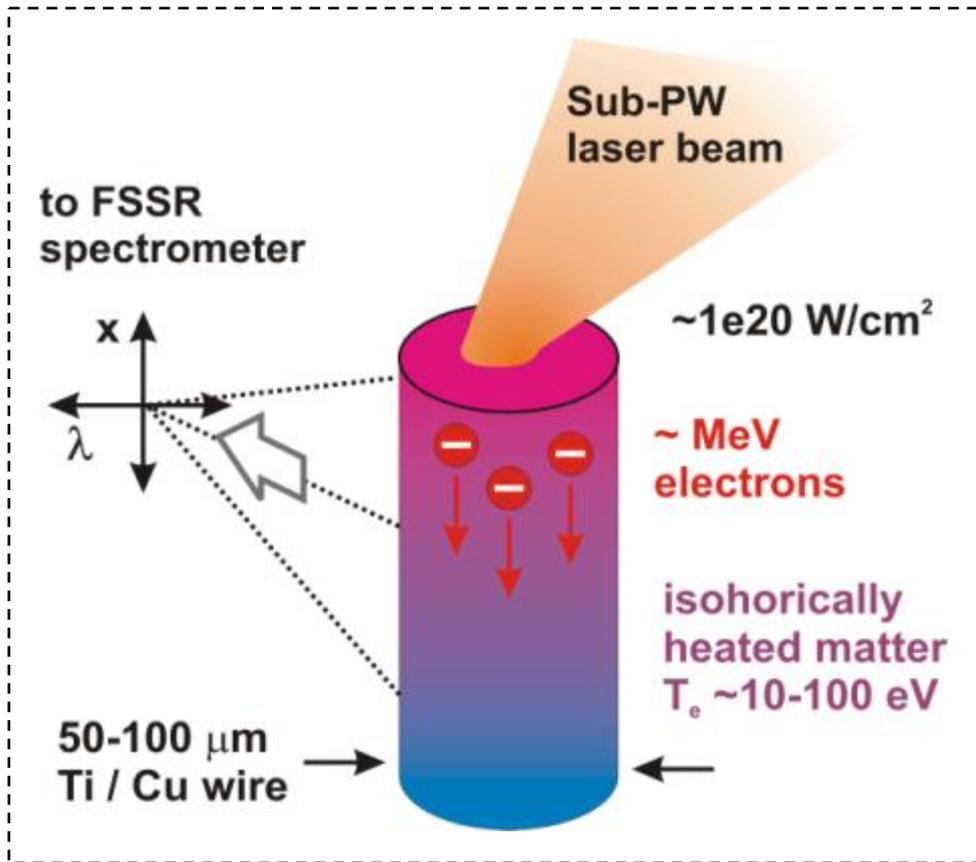


$T_e \sim 40$  eV - near the focal spot

$T_e \sim 10$  eV - at 100 um from the center

Exponential decrease of Ka-line intensity

# Particular realization - free standing wire target



Off-axis parabola  
Ti wire of  $\text{Ø} 50 \mu\text{m}$  and polished tip



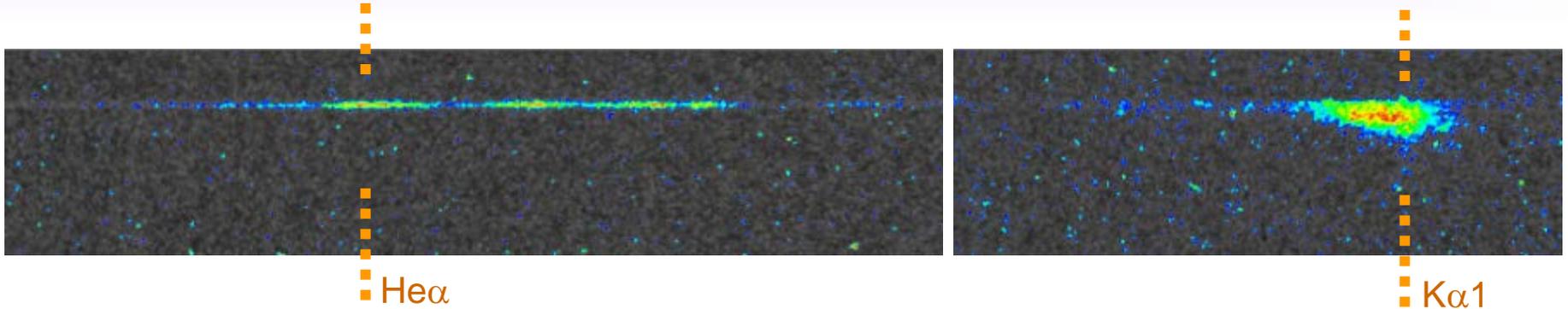
Hard X-ray IP

PHELIX laser beam used:

- 200 J on target, 1 ps pulse duration
- focused by off-axis parabola to  $\sim 5 \mu\text{m}$  spot  $\text{Ø}$
- on polished tip of the wire
- high pulse contrast of  $1e6-1e10$  on demand



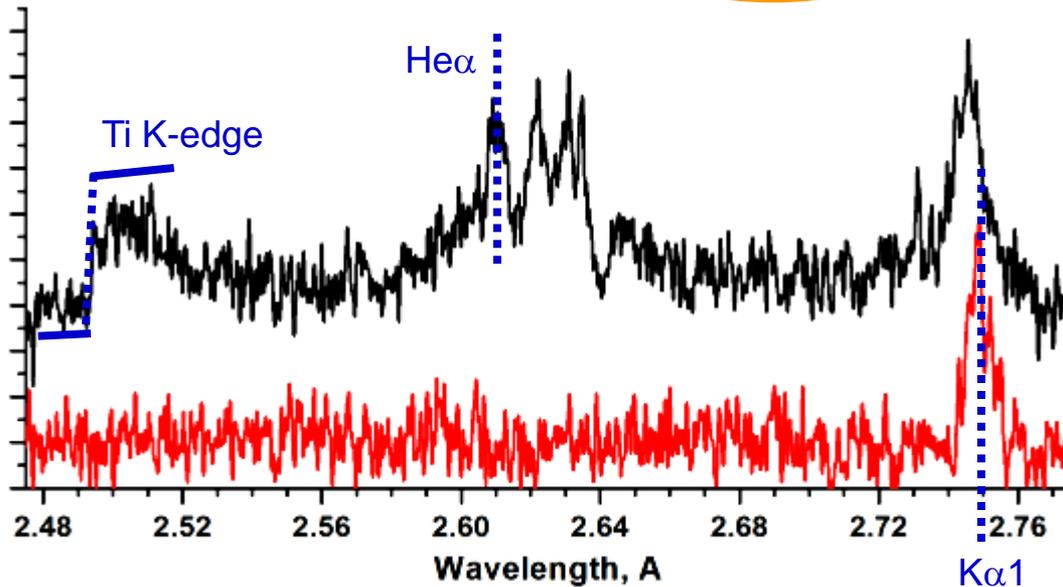
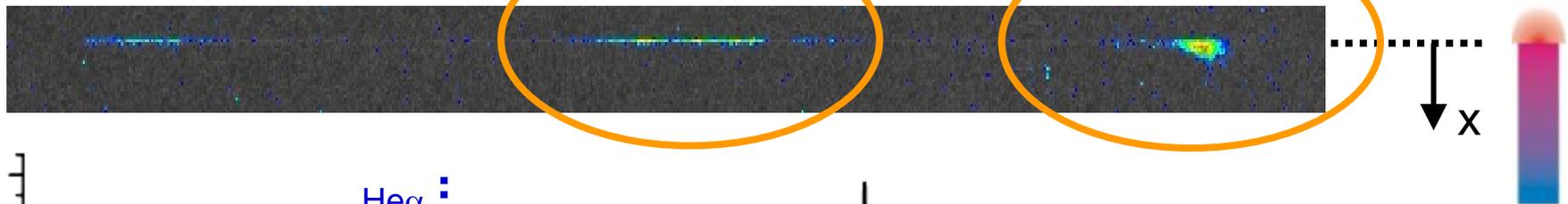
# Experimental results - references



Ti Ly $\alpha$  sat.

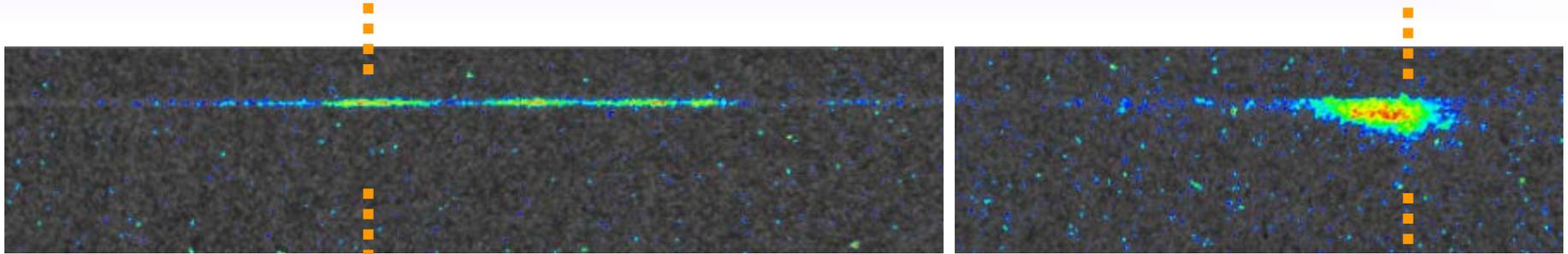
Ti He $\alpha$

Ti K $\alpha$



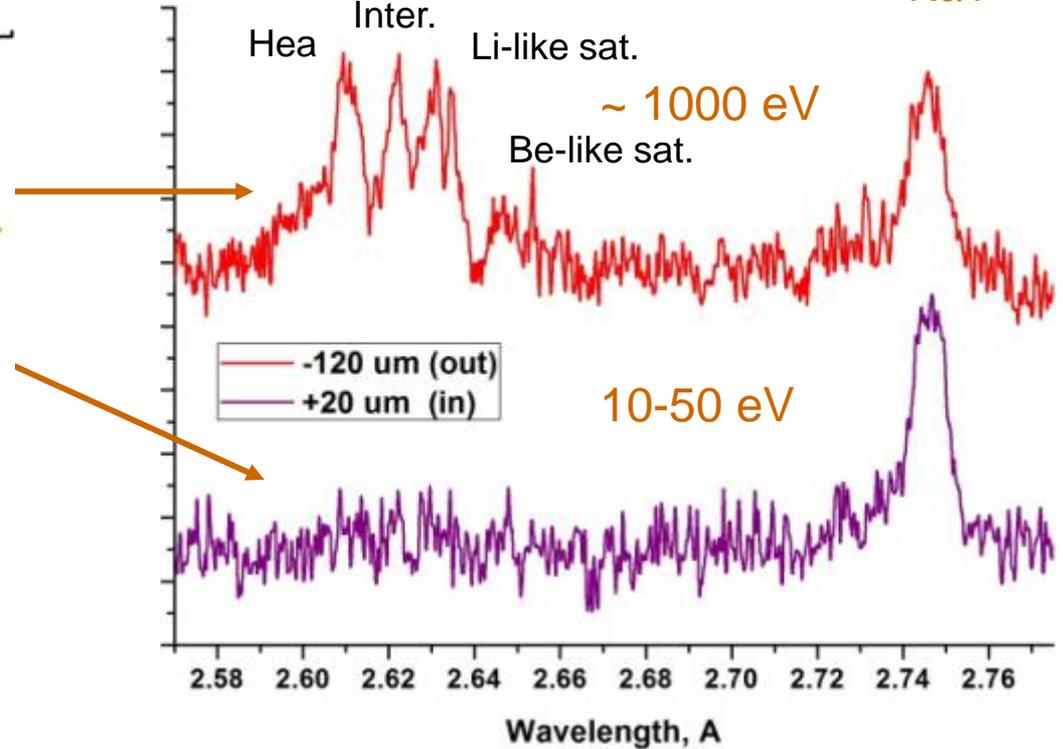
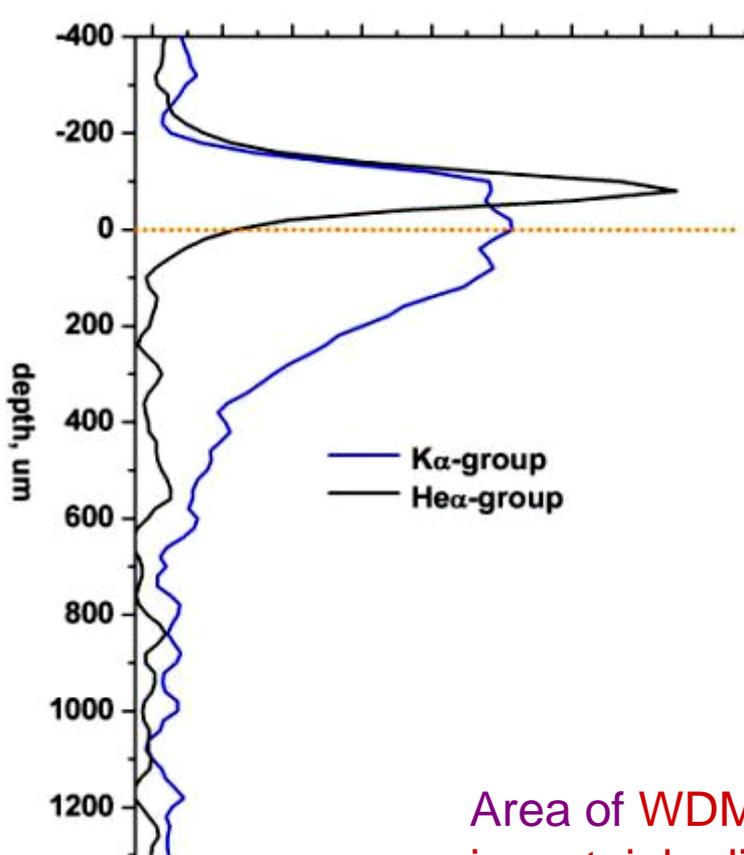
*Reliable and precise references  
for spectral dispersion:  
K-edge of absorption, neutral K $\alpha$ 1.  
Positions of K $\alpha$ -satellites can be  
measured with 1 mÅ precision*

# Experimental results - references



He $\alpha$

K $\alpha$ 1

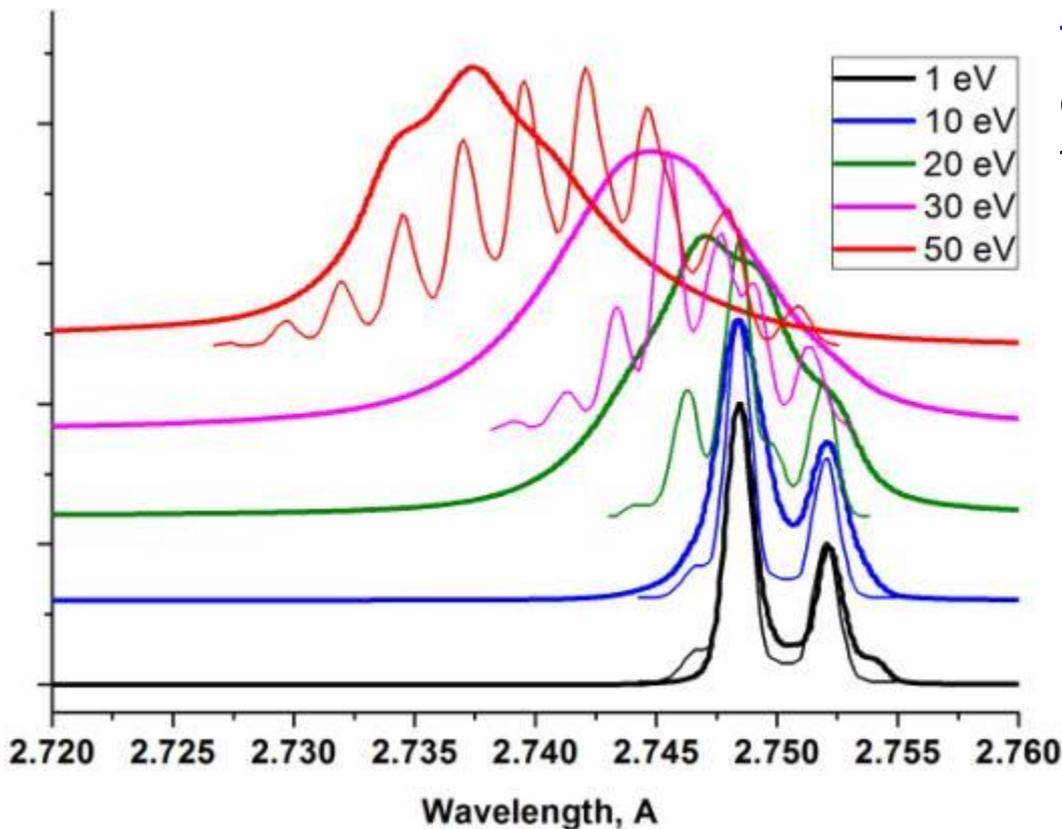


Area of WDM isochorically heated by hot electron flow only is certainly distinguished from that one heated by the laser

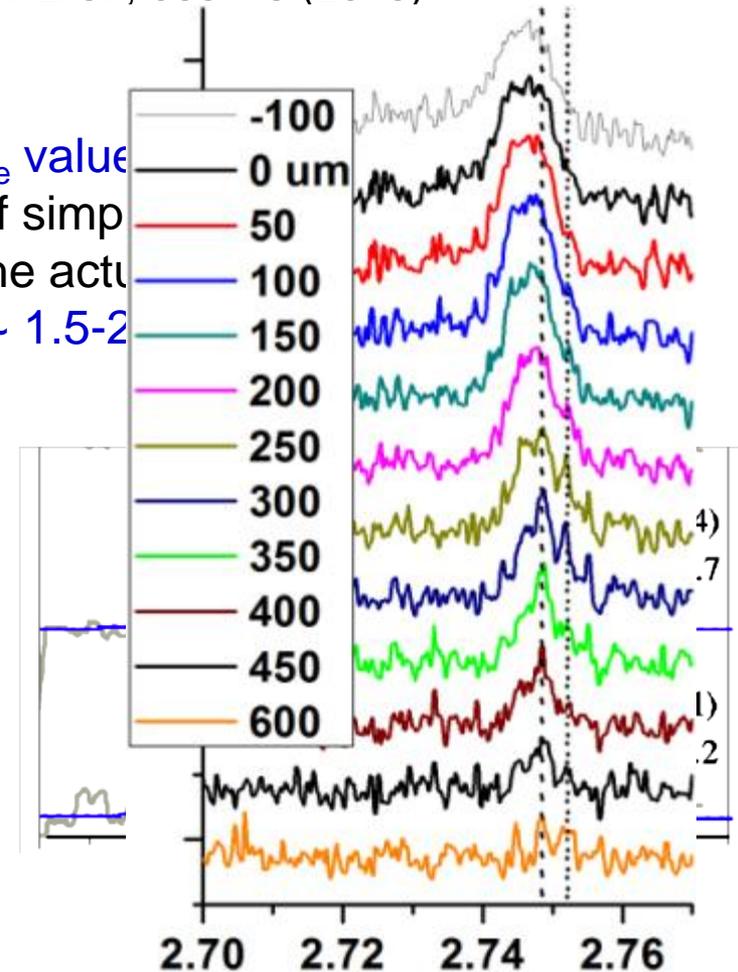
# Spectra simulation issues

First spectra simulations for WDM radiation applied configuration-averaged MUZE model  
// S.B. Hansen et al., *PRE* 72, 036408 (2005)

Several synthetic DL/CA approaches are developed, particularly with a combination of NLTE FLYCHK and FLYSPEC codes // M. Murillo et al. *PRE* 87, 063113 (2013)



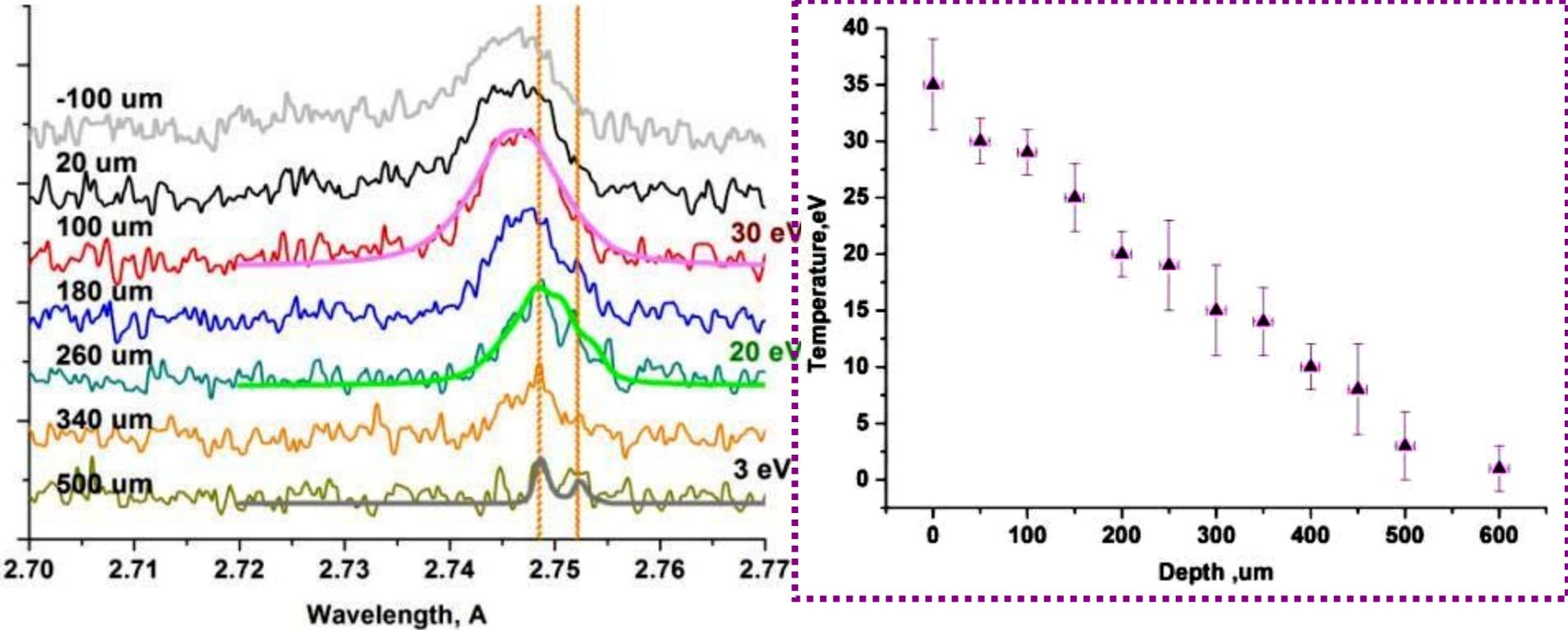
$T_e$  value  
of simp  
the actu  
~ 1.5-2



# Experimental results - $T_e$ measured

0.5 ps, 200 J, 6  $\mu\text{m}$  focus $\varnothing$

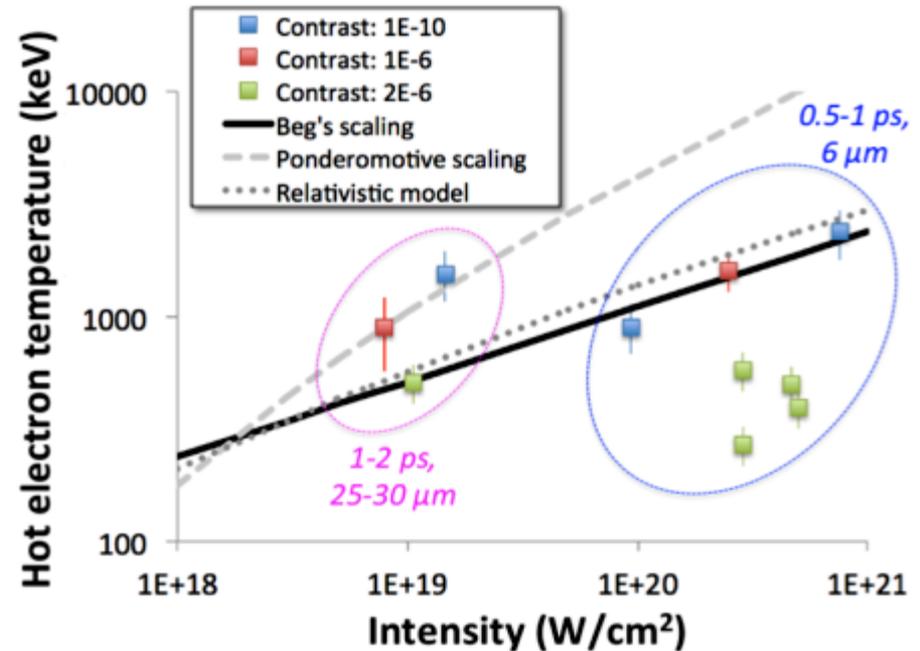
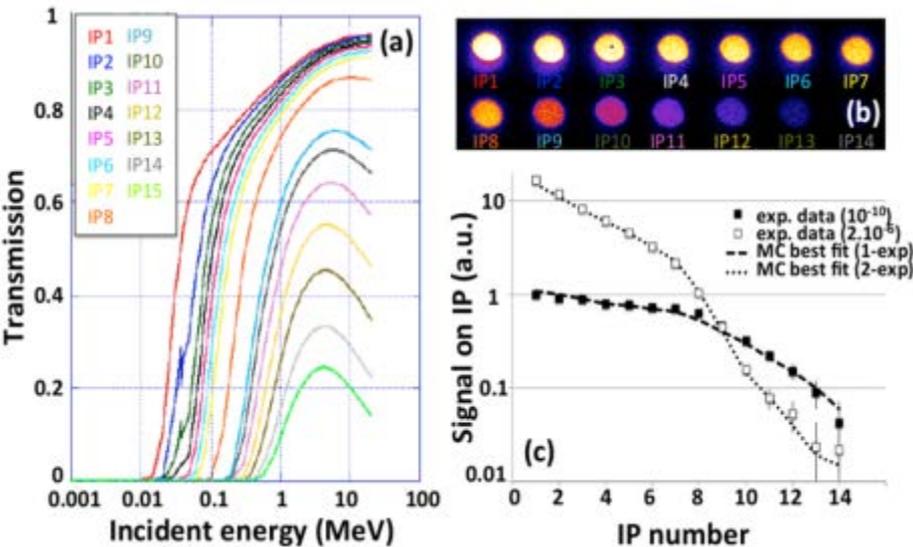
$I \sim 5e20$  W/cm $^2$



In both cases highest  $T_e$  achieved by isochoric heating is of  $\sim 35$  eV, which is in general below expectations

# Hard X-rays data

Estimations on hot electron energy spectra using bremsstrahlung cannon data



Stopping power of cold Ti for 2 MeV e<sup>-</sup> is of **~0.6 MeV/mm**

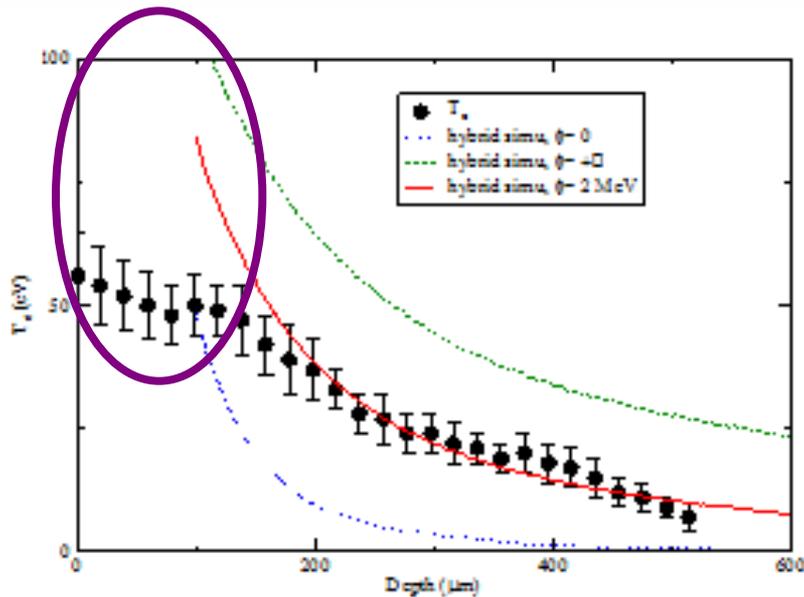
The stopping range of **3 mm** was expected due to collisional losses in cold Ti



$T_{hot}$  measured with tight laser focusing follows Beg's scaling law

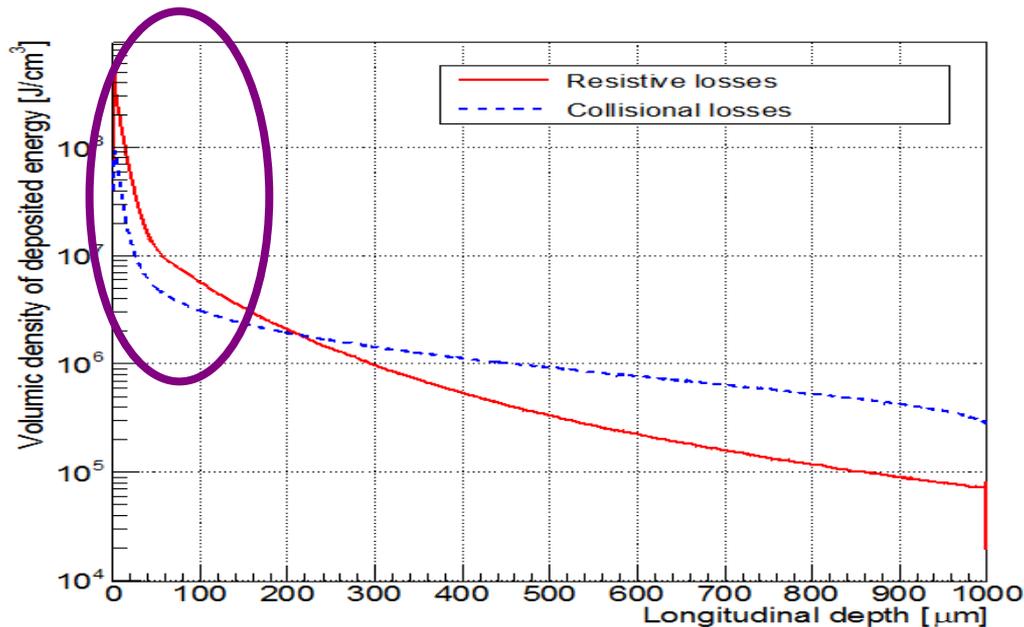
Hard X-ray data gives the temperature of hot electron tail of **~2 MeV (as expected)**

# Hybrid simulation data, resistive vs collisional losses



Allowing to estimate the effect of refluxing at wire boundaries, as well as the ratio between collisional and resistive losses

At first 150  $\mu\text{m}$  of the trajectory resistive losses may exceed collisional ones by factor of 2.3

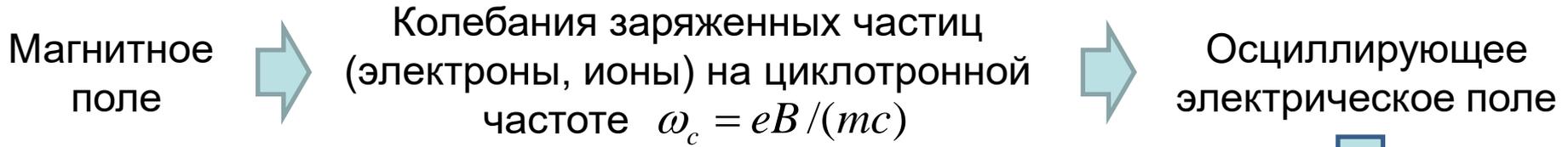


“Depression” of isochoric heating of matter at the beginning of MeV electrons stopping trajectory is still challenging question

# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- **Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.**
- **Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW**

# Spectroscopy measurements on EM-fields in laser plasma



Измеряя положение ПС находим  $\omega$  и  $B$

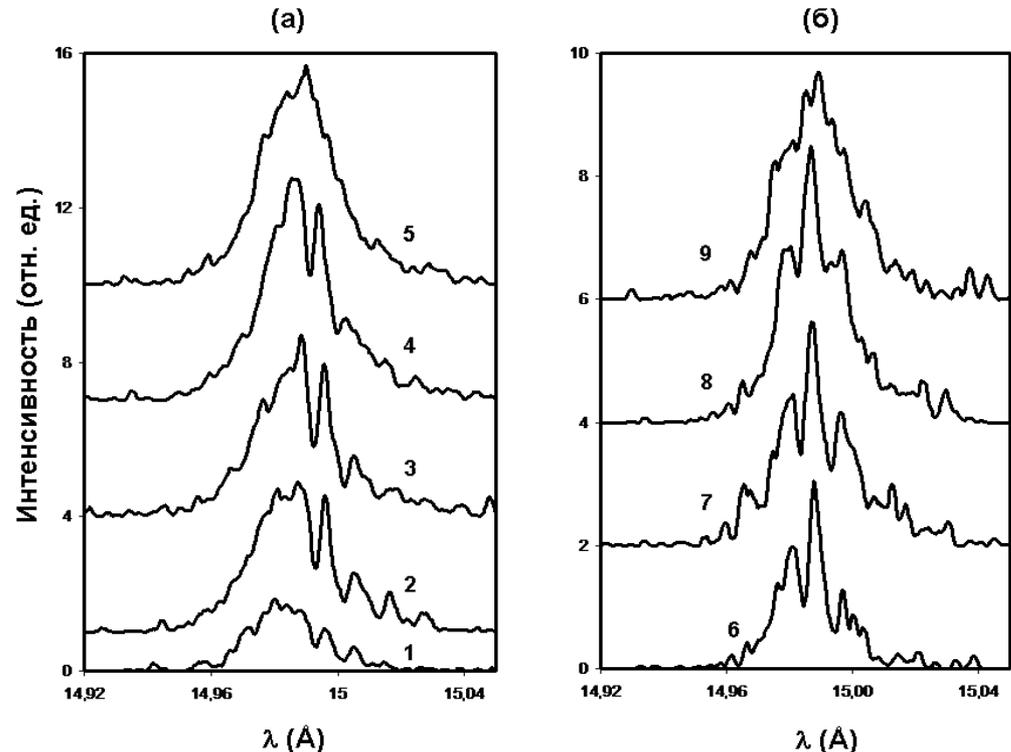
Появление дополнительных спектральных линий с частотами, сдвинутыми от частоты атомного перехода на гармоники циклотронной частоты (плазменные сателлиты, ПС).

## Астрофизическая плазма

Солнечная корона  $\sim 10^3$  Гс  
Нейтронные звезды  $\sim 10^{12}$  Гс  
Магнитары  $\sim 10^{15}$  Гс

## Лабораторная (лазерная) плазма

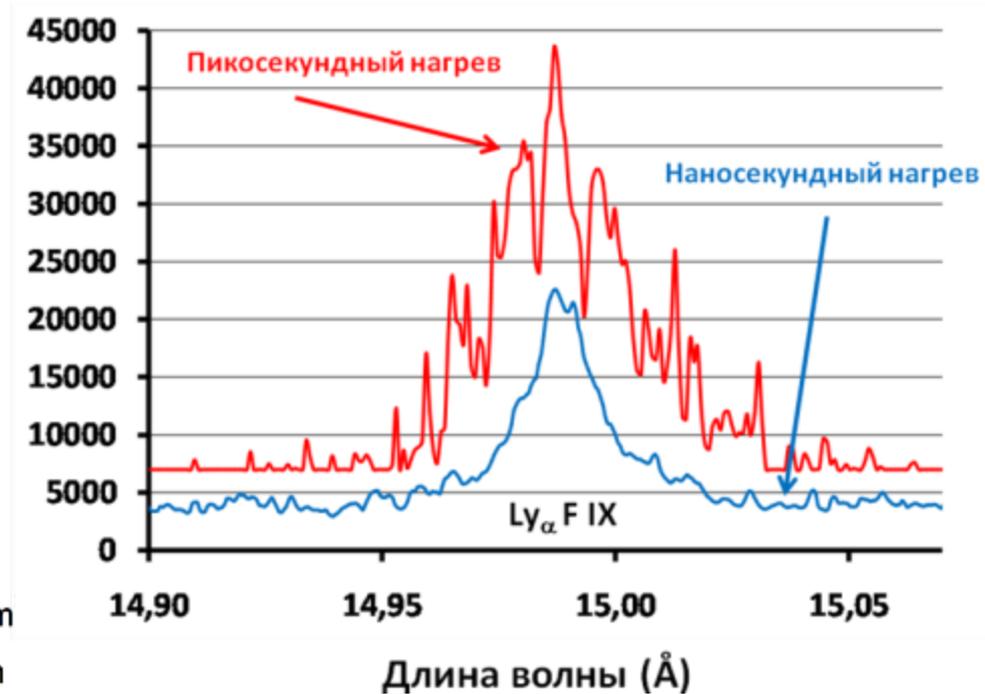
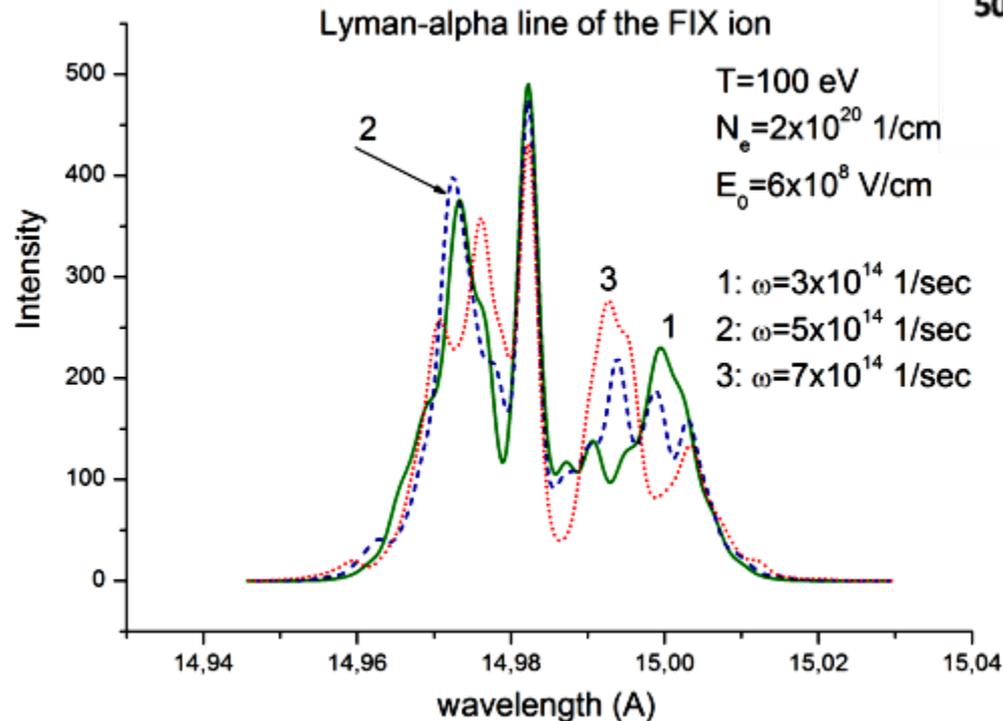
$B \sim 0.1 \Gamma_{\text{las}} (\text{Вт/см}^2)^{1/2}$   
При  $\Gamma_{\text{las}} = 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>  
 $B = 10^8$  Гс



# Measured and simulated oscillating features in spectral line

The following was taken into account in the calculation :

- fine structure of atomic levels
- Doppler effect
- optical depth
- line broadening due to quasistatic ion field



Perspective to continue experiments with ps pulse duration but to increase the laser intensity from  $10^{18}$  to  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> is very attractive

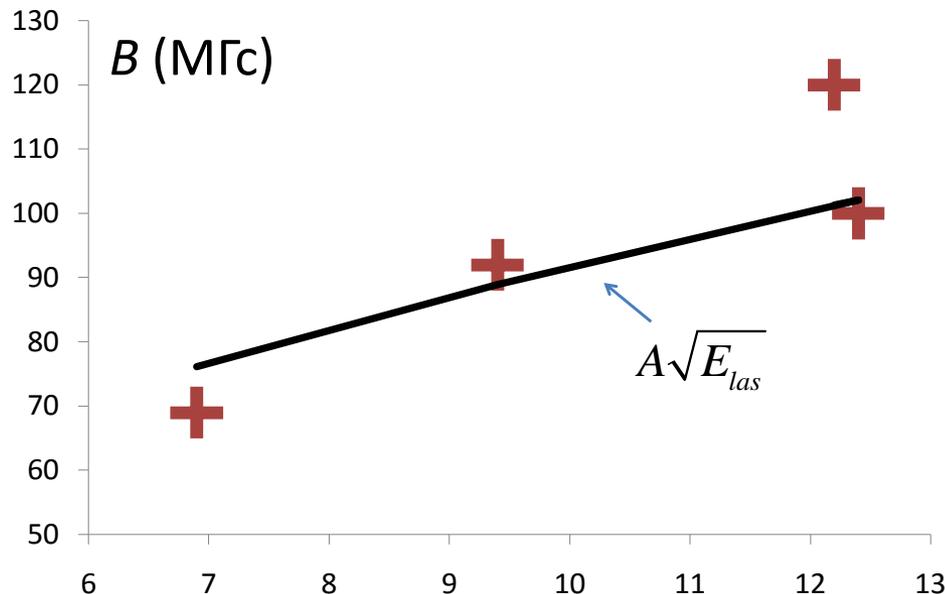
# Modeling - Values of magnet field in laser plasma

Exp. #	$E_{\text{las}}$ (J)	$\delta\lambda$ for F Ly $_{\alpha}$ (Å)	Oscillation frequency (s $^{-1}$ )	Magnet field (G)
14	12.2	0.023	$1.95 \times 10^{15}$	$1.2 \times 10^8$
10	12.4	0.0195	$1.65 \times 10^{15}$	$10^8$
8	9.4	0.0175	$1.48 \times 10^{15}$	$9.2 \times 10^7$
12	6.9	0.013	$1.1 \times 10^{15}$	$6.9 \times 10^7$
$q_{\text{las}} =$ $2 \times 10^{17}$ BT/cm $^2$		0.011	$0.93 \times 10^{15}$	$5 \times 10^7$

Measured value –  
frequency of electric field  
oscillations

With the assumption that  
E field oscillations caused by  
cyclotron oscillation –  
it is possible to estimate  
magnet field strength

Magnet field strength depends  
on laser energy  $\sim \sqrt{E_{\text{las}}}$   
as predicted in theory



# Spectroscopy measurements on ion energy distribution

Theoretical modeling of the experimentally observed relative intensities and shapes of spectral lines allows to estimate the following plasma parameters :

electron temperature  $T_e$

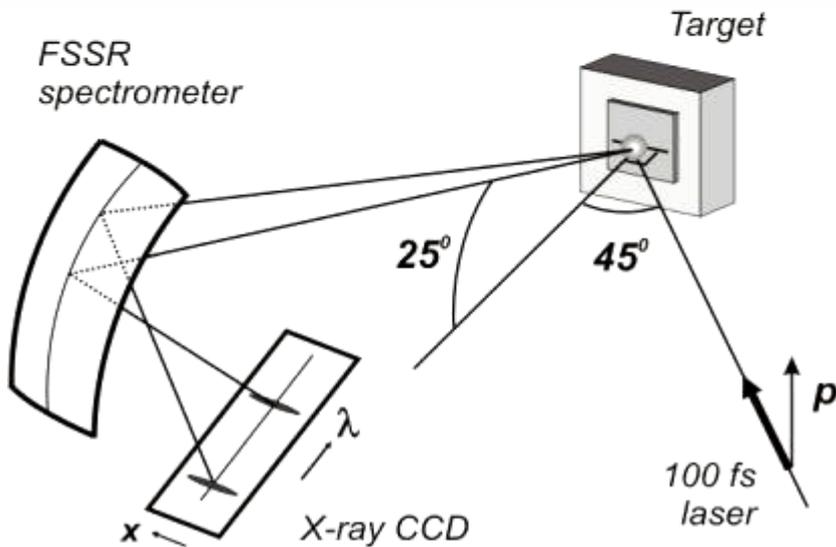
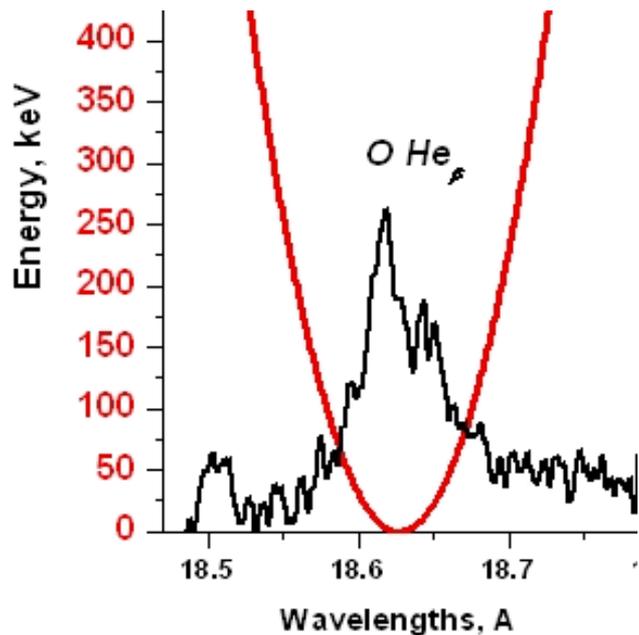
free electron density  $N_e$

ion charge state population  $E_{ion}$

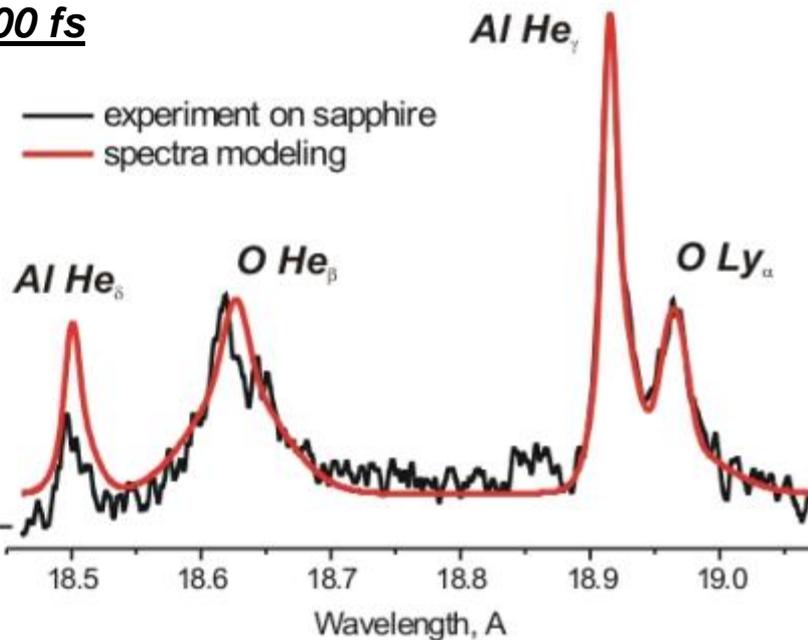
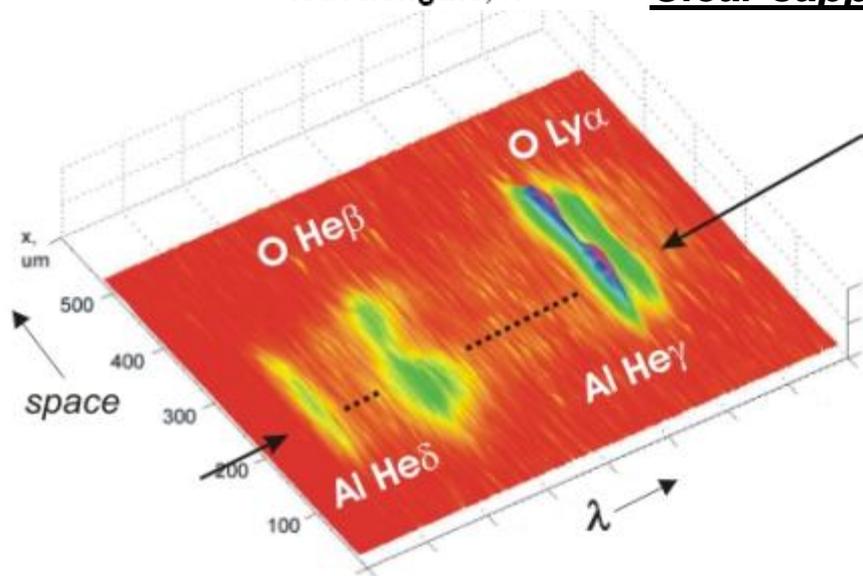
High resolution X-ray spectroscopy diagnostics of fast ions energy is based on sensitivity of the spectral line shape to the ion velocity distribution function through the Doppler effect.



# Ускорение в сплошных твердых телах



Clear sapphire, 100 fs



# Frozen nanodroplets target

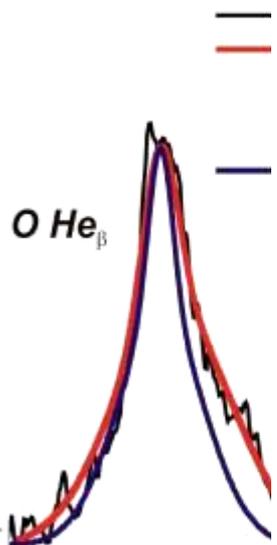
## H<sub>2</sub>O-nanodroplets on Sapphire substrate

100 fs

500 fs



H<sub>2</sub>O - snow

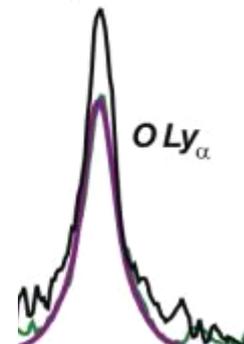


Parameter	Snow		Sapphire
	100 fs	500 fs	100 fs
N <sub>e</sub> cm <sup>-3</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>20</sup>
T <sub>e</sub> eV	90	88	93
T <sub>ion</sub> keV	<b>7</b>	3	<b>3</b>
T <sub>flow</sub> keV	<b>90</b>	40	<b>50</b>
b <sub>He</sub> /b <sub>H</sub>	4	4	4



→ λ

100 fs  
500 fs  
doping

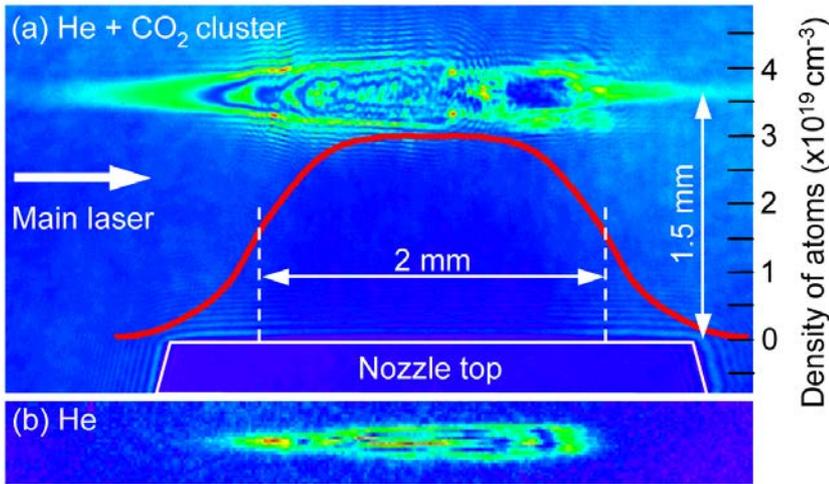


.9 19.0

Wavelengths, Å

- According to X-ray spectroscopy measurements the improvement in fast ion acceleration increases correspondingly to absorption efficiency

# Ion acceleration achieved in gas cluster targets

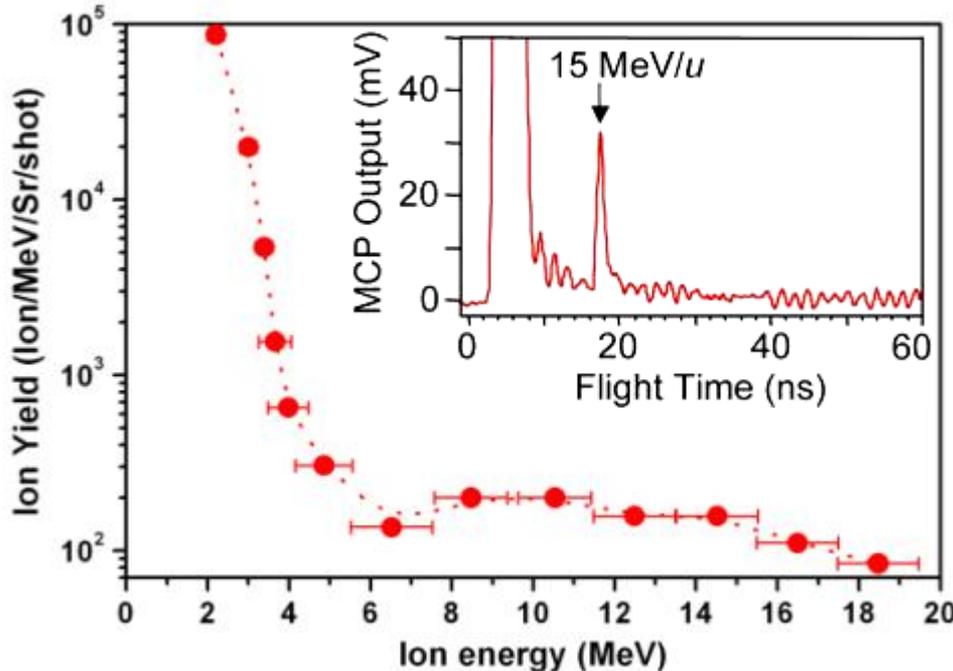


The choice of optimal conditions both for submicron gas clusters creation and for laser beam focalization provides in-order higher energy of generated ion flow.

**4 TW** 30 fs laser pulses absorbed in 1  $\mu\text{m}$  gas clusters initiated fast ion flow with energy  **$\sim 10$  MeV**

Fast ion energy linearly dependent on laser intensity

With **10-20 TW** laser facility we can expect ( **$10^7$  ions/shot**) yield of **4-5 MeV** ions



# Радиационная диагностика - направления работ лаборатории и результаты

- Рентгеновская спектроскопия для исследований МГД явлений с астрофизическим подобием
- Ионная радиография для диагностики малоконтрастных и короткоживущих объектов и плазменных явлений
- Рентгеновская радиография сверхзвуковых плазменных потоков, ударных волн и аккреционных явлений.
- Спектроскопия полых ионов и плазма в условиях доминирования радиационных каналов возбуждения
- Рентгеновская спектроскопия для измерений Warm Dense Matter
- Рентгеновская спектроскопия для диагностики процессов генерации в плазме МэВ-ных потоков заряженных частиц и плазменных ЭМ полей.
- **Метрологическое обеспечение экспериментов, в т.ч. на XFEL и optical PW**

# Metrology for XFEL and optical PW HEDP experiments

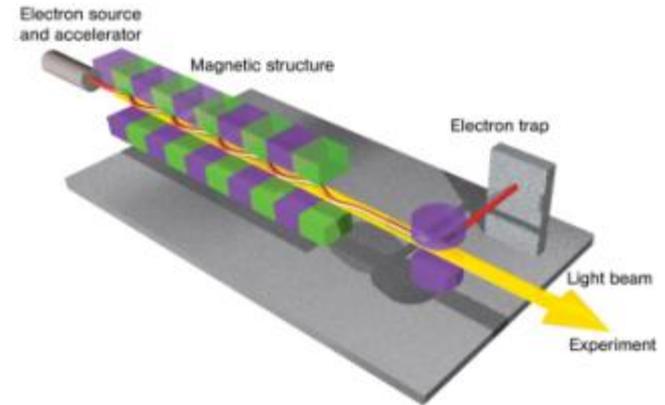
- Создание методов и средств диагностики пучков рентгеновских лазеров, синхротронных источников и характеристик рентгенооптических элементов
- Разработка и создание оборудования для высокоразрешающих измерений спектров многозарядных ионов. Создание программного обеспечения для расчета аппаратных функций применяемого оборудования.
- Исследование откольной прочности, механизмов абляции и наноструктурирования материалов при воздействии интенсивного когерентного рентгеновского излучения
- База данных по энергетическим уровням и спектрам многозарядных ионов  
Spectr-W3 - <http://spectr-w3.snz.ru>



# HED Scientific topics

Photon energy – 1-25 keV range  
Intensity – up to  $5 \times 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>  
Coherent, monochromatic.  
100 fs time resolution for pump-probe

Combined with sub-kJ and sub-PW optical lasers for HEDP research



## *XFEL-pump*

## *XFEL-probe*

- Плазма с доминирующей ролью радиационных процессов
- Временная и пространственная компрессия рентгеновских импульсов в плазме, релятивистский пробой вакуума
- Модификация неустойчивостей в плазме оптических лазеров
- Пределы откольной прочности и абляции материалов, наноструктурирование поверхности твердых тел
- Изохорический нагрев вещества, **Warm Dense Matter**
- Нелинейные атомные процессы в присутствии положительных ионов

# HED Scientific topics

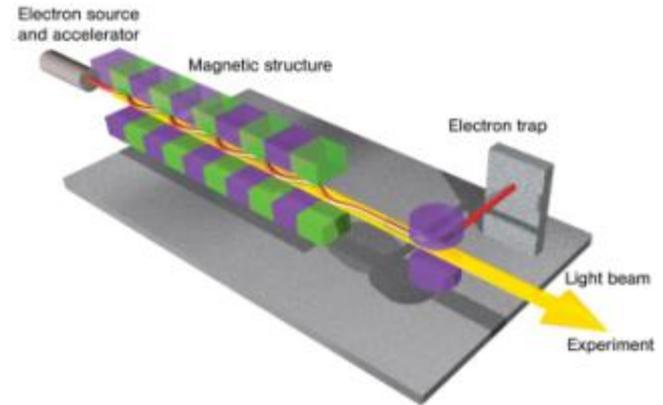
Photon energy – 1-25 keV range

Intensity – up to  $5e17$  W/cm<sup>2</sup>

Coherent, monochromatic.

100 fs time resolution for pump-probe

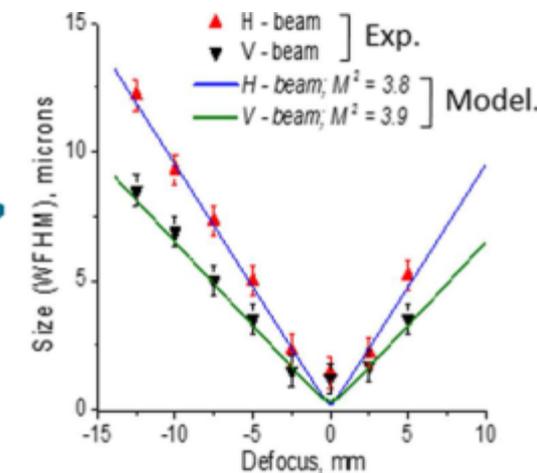
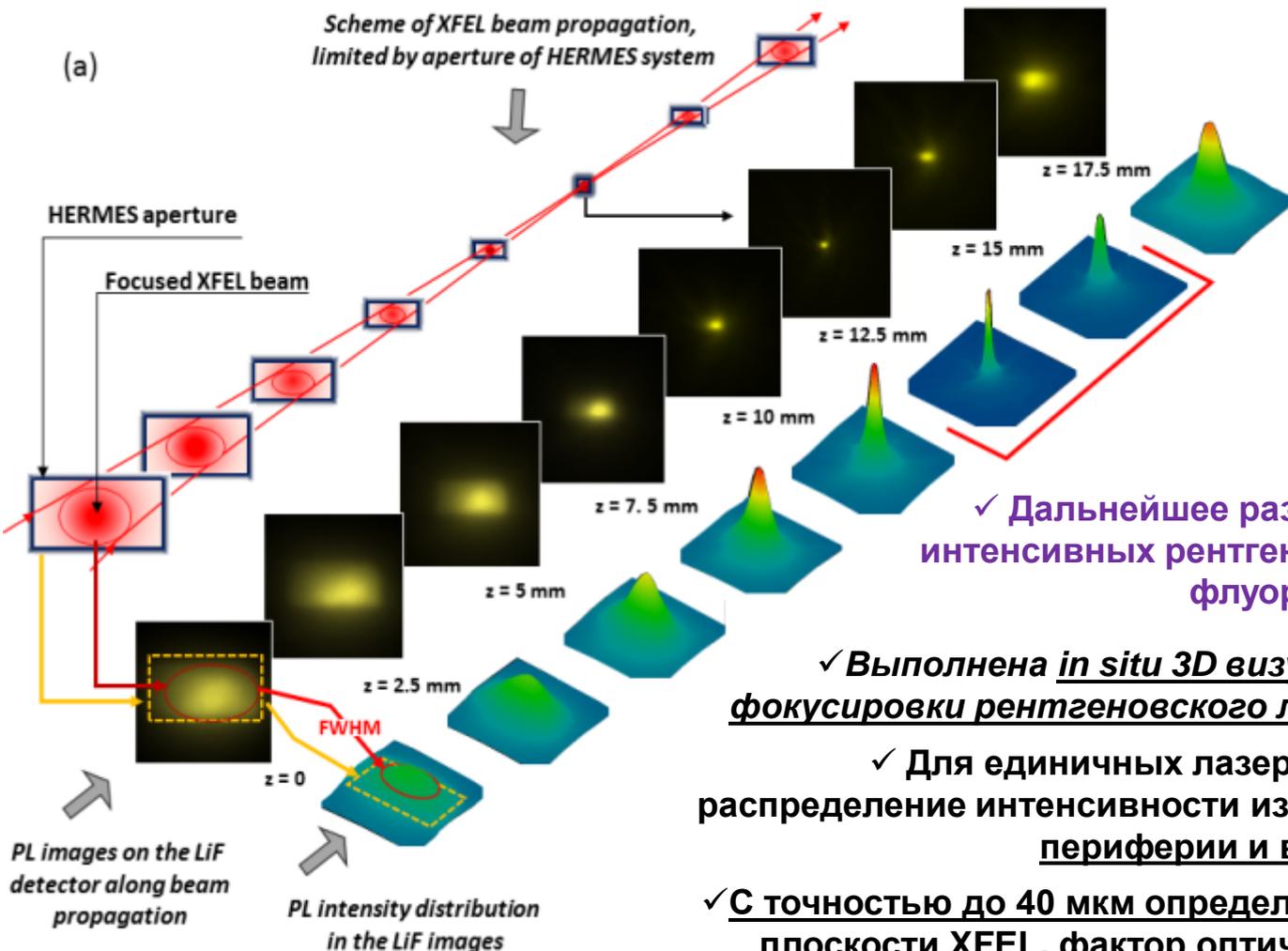
Combined with sub-kJ and sub-PW optical lasers for HEDP research



*XFEL-probe*

- Лазерно-индуцированные ударные волны и широкодиапазонные УРС
- Сверхбыстрые фазовые переходы в веществе под воздействием интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов
- (Магнито)-Гидродинамические явления в лабораторной астрофизике
- Методы голографической диагностики параметров XFEL пучков, диагностические инструменты для HED экспериментов

# Измерение параметров и трехмерная визуализация пучков рентгеновских лазеров на свободных электронах



✓ Дальнейшее развитие метода диагностики интенсивных рентгеновских пучков с помощью флуоресцентных детекторов LiF

✓ Выполнена in situ 3D визуализация профиля пятна фокусировки рентгеновского лазера SACLA ( $E_{ph} = 10$  keV)

✓ Для единичных лазерных импульсов построено распределение интенсивности излучения одновременно на периферии и в центре фокального пятна

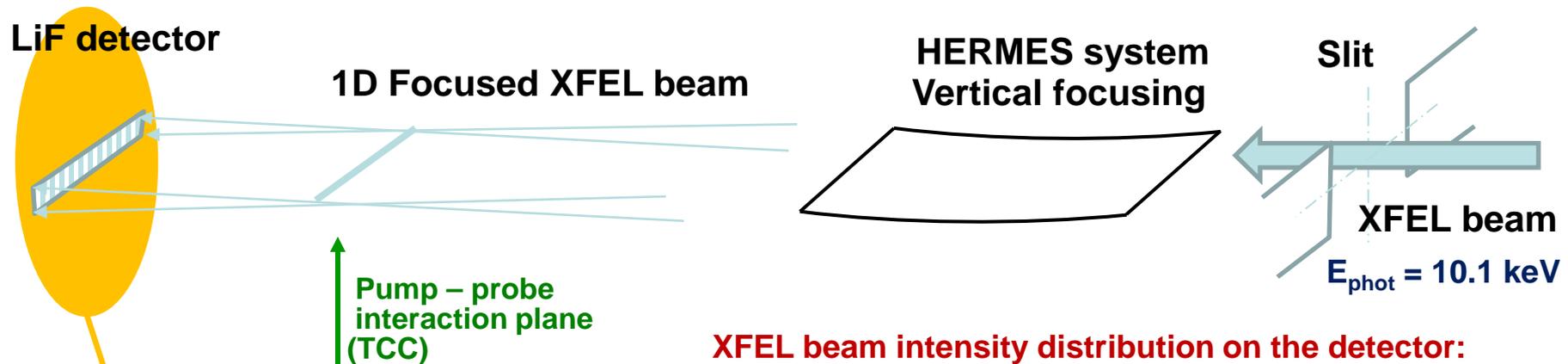
✓ С точностью до 40 мкм определено положение фокальной плоскости XFEL, фактор оптического качества пучка  $M^2$

✓ Исследован фундаментальный предел пространственной разрешающей способности метода, составивший 0.4 - 2.0  $\mu\text{m}$  для энергии фотонов 6 - 14 кэВ

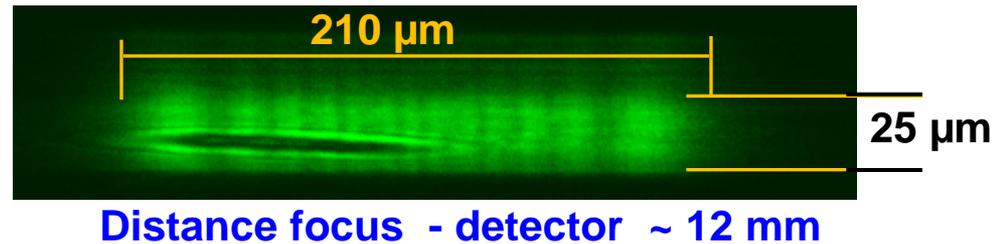
Опубликовано в *Scientific Reports* 5, 17713 (2015)

# XFEL probe beam quality control

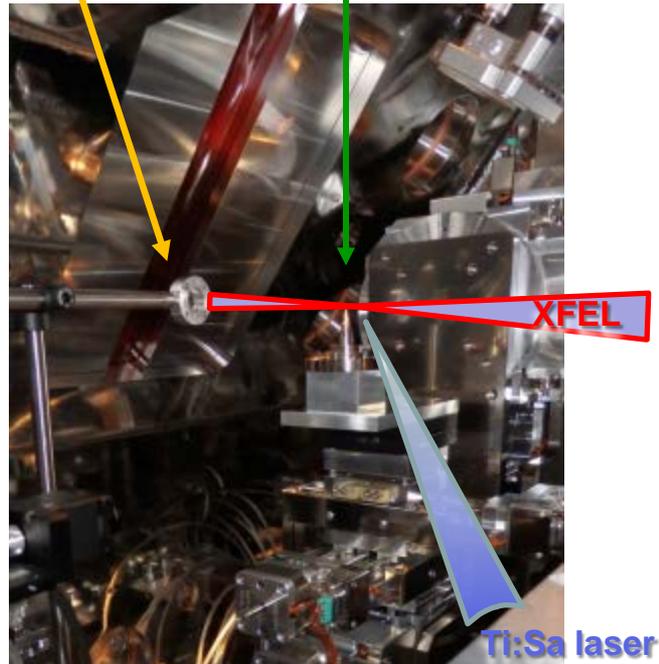
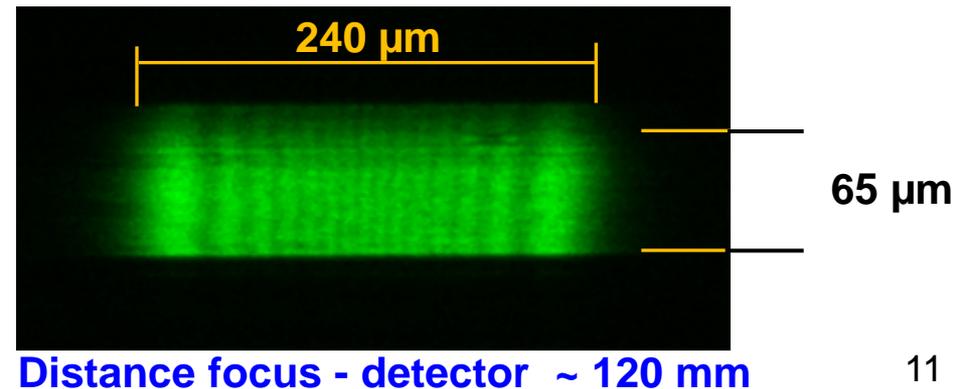
## Measurements of XFEL beam profile vertically focused by HERMES system



**XFEL beam intensity distribution on the detector:**



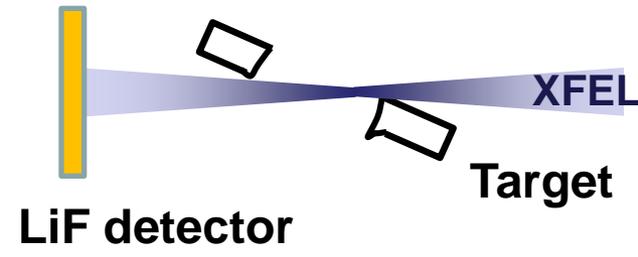
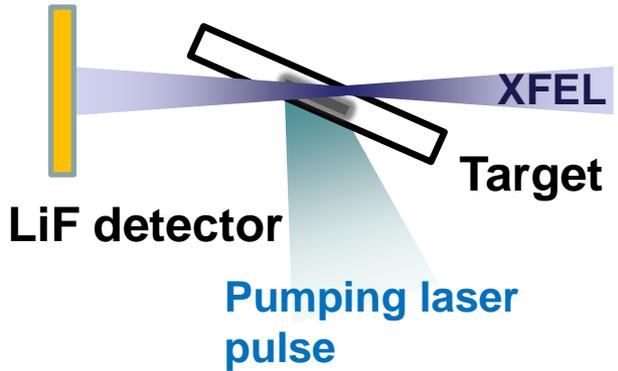
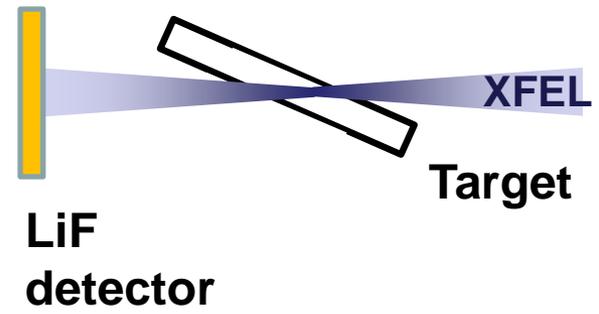
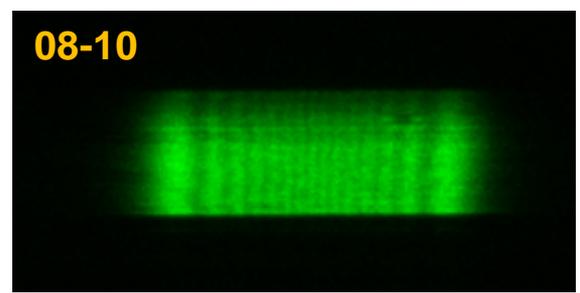
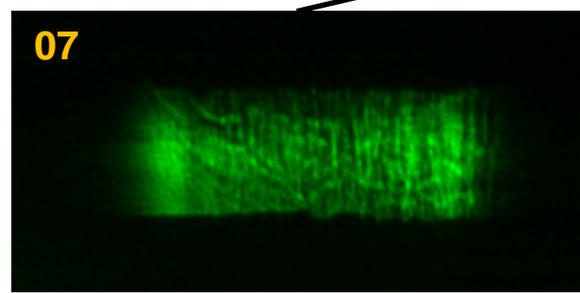
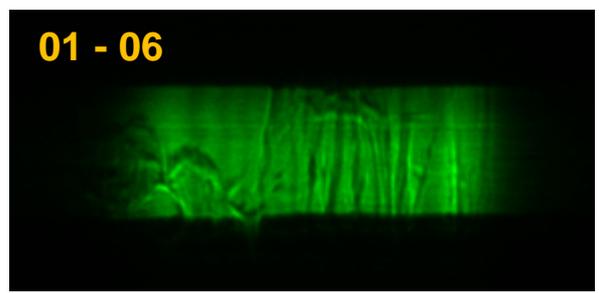
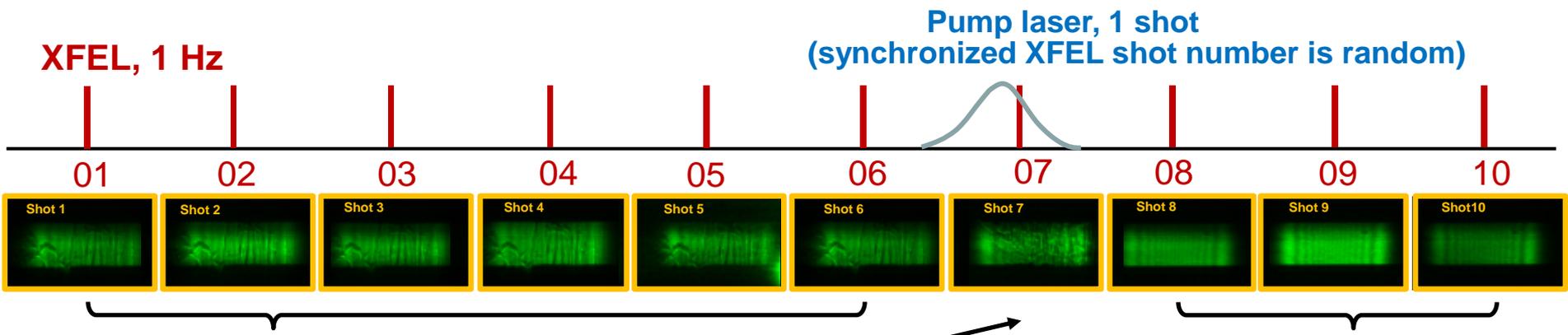
**After improvement of the beam**



**Experimental setup**

# First observation of pump-probe interaction by the LiF detector

Probe: XFEL, 10.1 keV, 400  $\mu$ J  
Target: 30  $\mu$ m polypropylene + 40  $\mu$ m Ge  
Target inclination: 24 $^\circ$



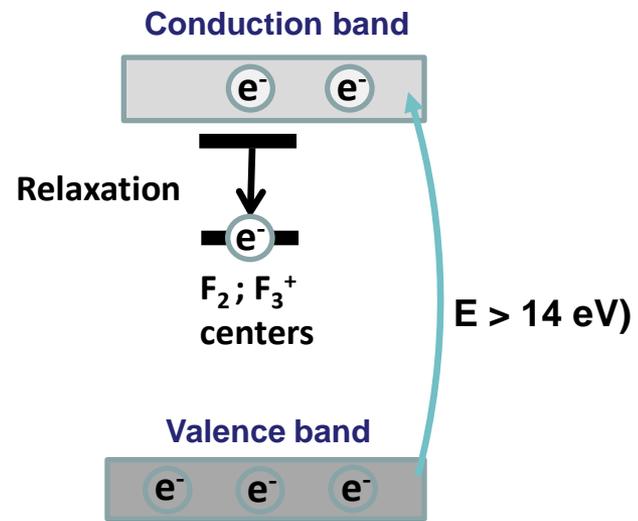
# Принципы детектирования – формирование центров окраски в LiF

Among all alkali halides LiF is special:

- In LiF F-type color centers (CCs) reemit in the visible range (green-yellow-red)
- In LiF CCs are very stable at room temperature
- The band-gap is the largest (14 eV)
- LiF is not sensitive to visible light and near UV radiation
- Submicron spatial resolution was demonstrated for soft and hard X-ray radiography

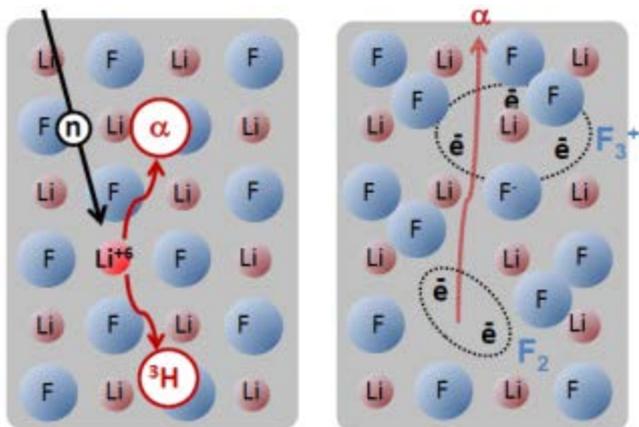
In LiF the color centers are created under ionizing radiation:  
XUV, X-rays, electrons, protons, neutrons

**F<sub>2</sub> and F<sub>3</sub><sup>+</sup> color centers is a dominating feature for LiF detector**



## Creation of CCs

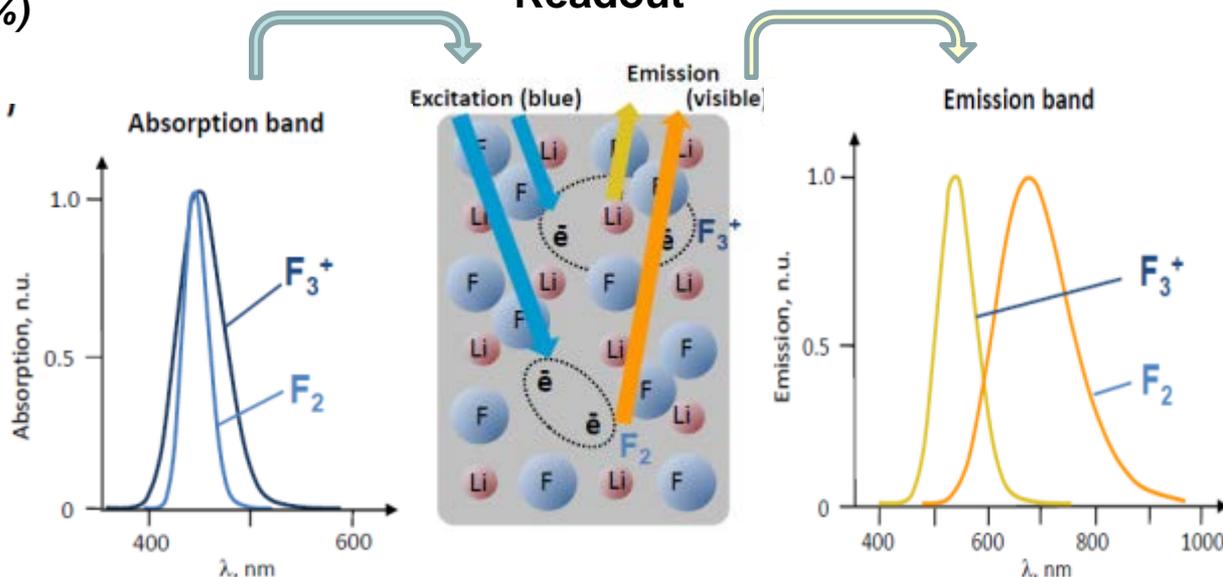
(Natural abundance of <sup>6</sup>Li is of 7.4 %)



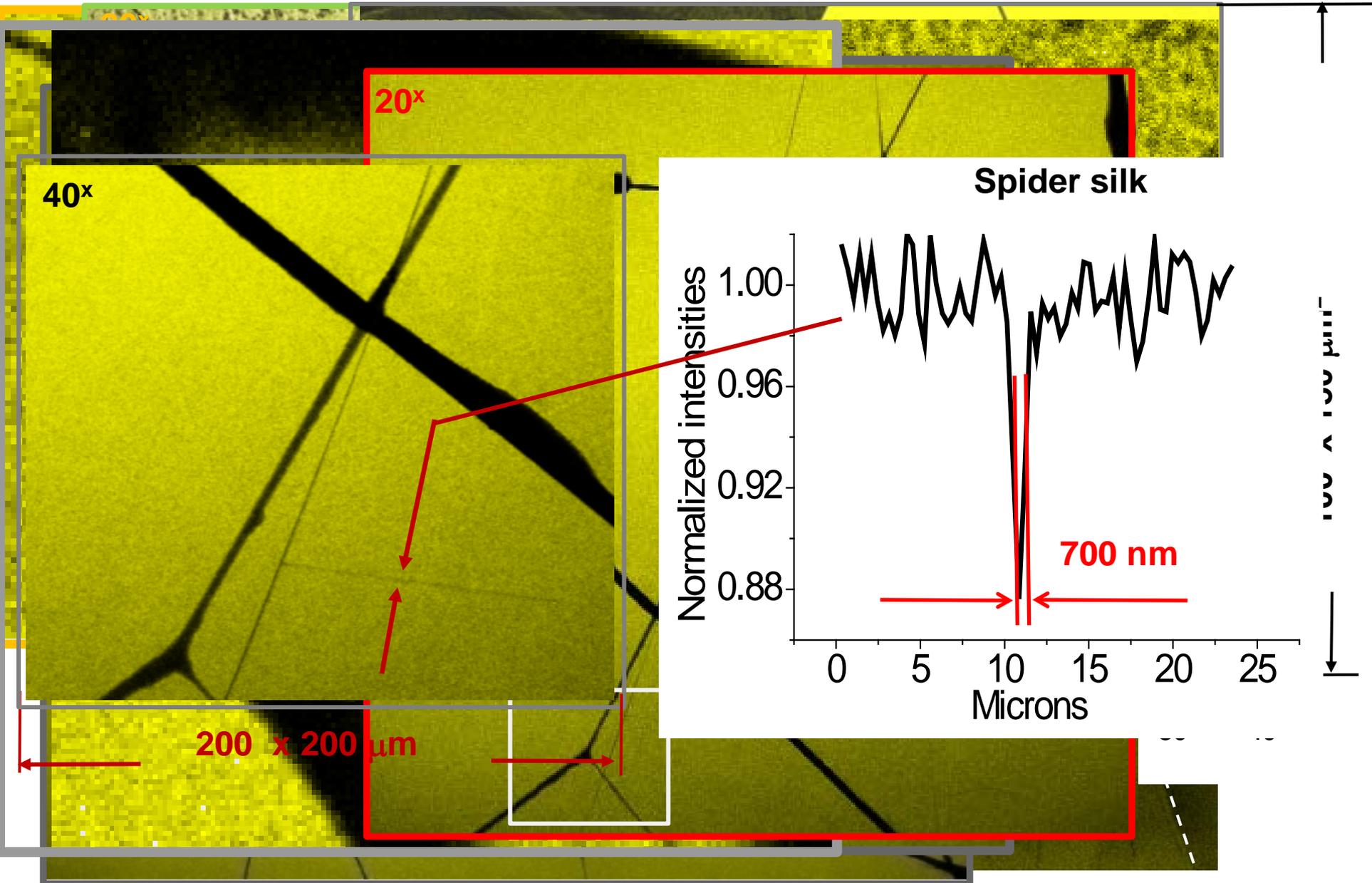
**α-particle:** deposited energy ~140 eV  
stopping range ~ 6 μm

**<sup>3</sup>H :** deposited energy ~33 eV  
stopping range 33 μm

## Readout



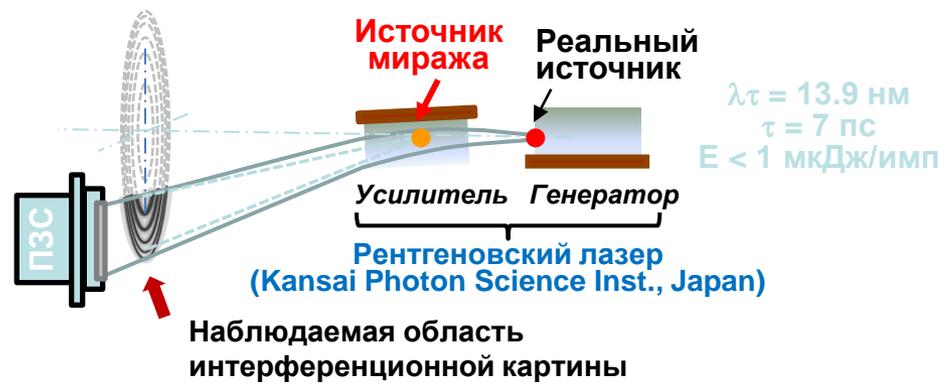
# X-ray radiography of spider web recorded on LiF detector



# Первое экспериментальное наблюдение и теоретическое обоснование рентгеновского когерентного миража при усилении первичного пучка в двухкаскадном рентгеновском лазере

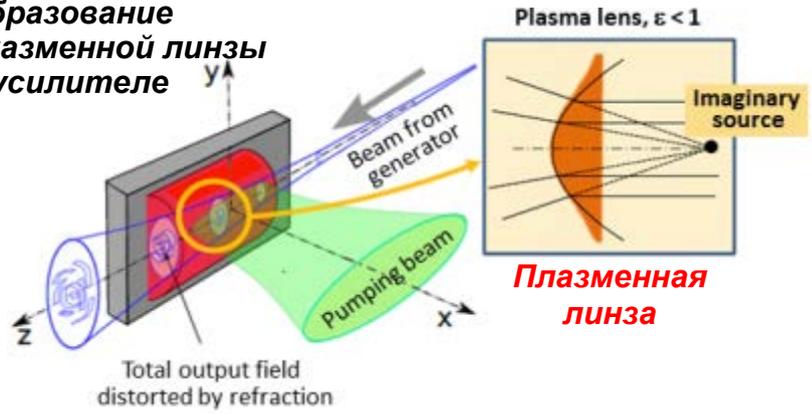
Показано, что в плазменной среде усилителя рентгеновского лазера происходит образование **вторичного когерентного источника, сфазированного с излучением генератора**, а условия его формирования аналогичны формированию миража в оптическом диапазоне. Наблюдаемое явление названо **Рентгеновский Когерентный Мираж**.

Схема наблюдения рентгеновского миража

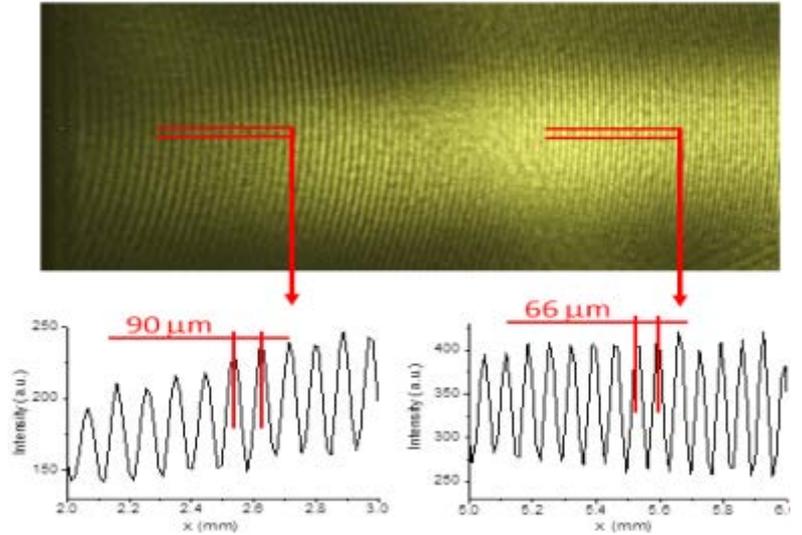


Для интерпретации наблюдаемого явления предложен **новый теоретический подход** и сформулированы необходимые и достаточные условия его возникновения

Образование плазменной линзы в усилителе



Интерференционные полосы в выходном излучении рентгеновского лазера

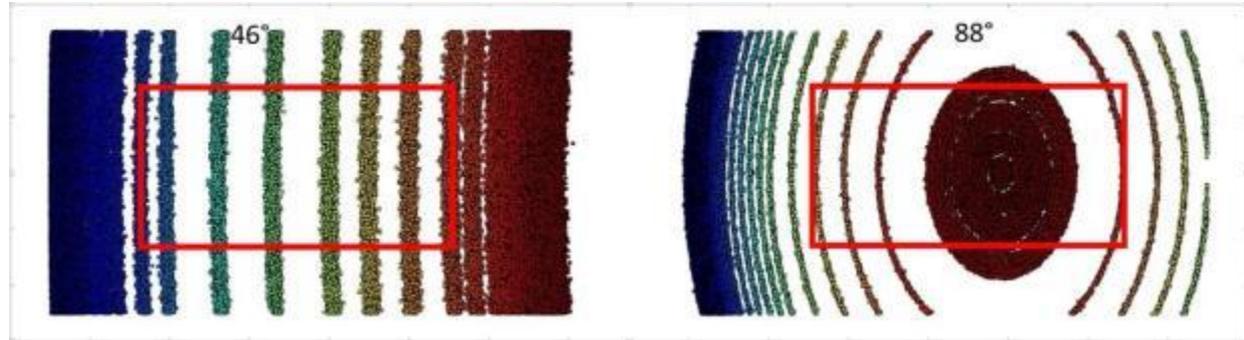


Полученные результаты углубляют понимание процессов усиления рентгеновского излучения в лазерно-индуцированных активных средах, а также представляют практический интерес для рентгеновской интерферометрии, рентгеновской литографии, для диагностики активных плазменных сред, а также для создания фазово-адаптивной рентгеновской плазменной оптики

// Nature communication, 4 (2013)  
Грант РФФИ – JSPS (Япония) 14-02-92107

# Ray-tracing software

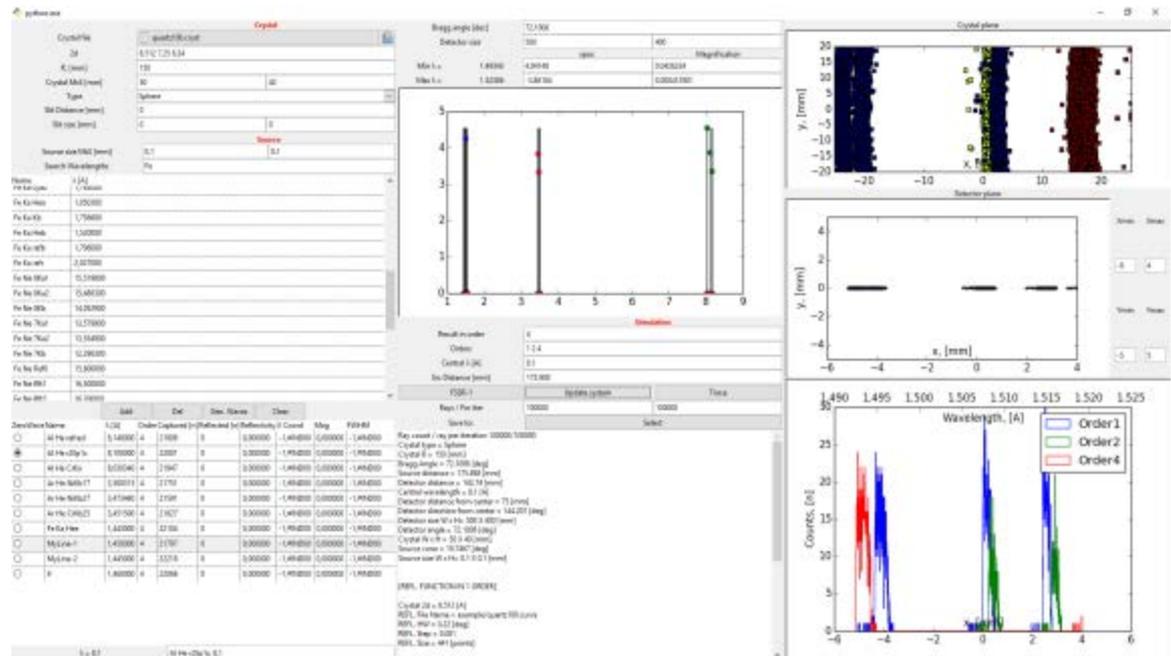
Precise modeling of a real X-ray spectrometer and X-ray backlighting schemes applied in exp.



*Aimed to reconstruct Instrumental functions of FSSR spectrometers in order to:*

- obtain **absolute intensities** of spectral lines
- study **imaging capabilities** of self-emission and BL imaging schemes

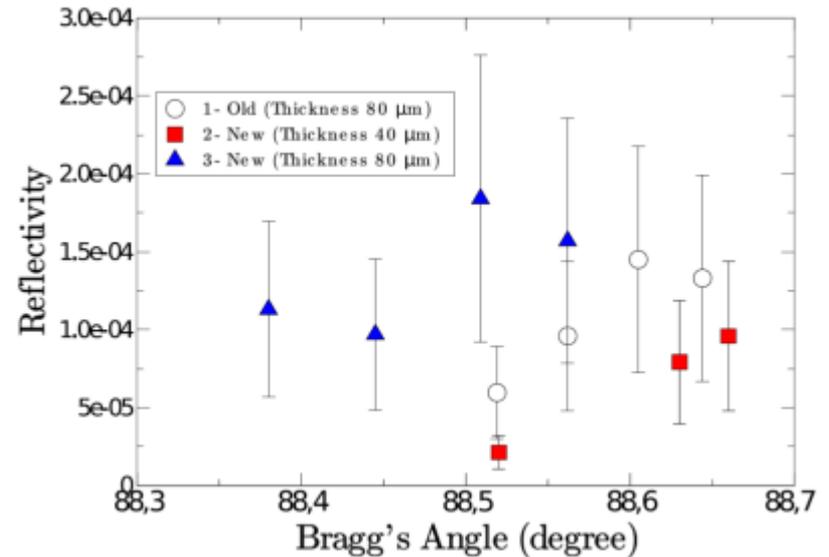
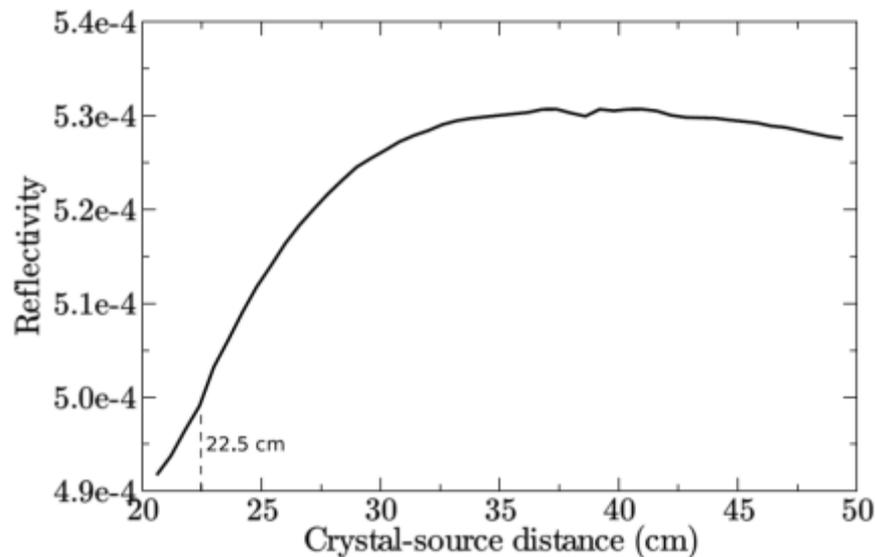
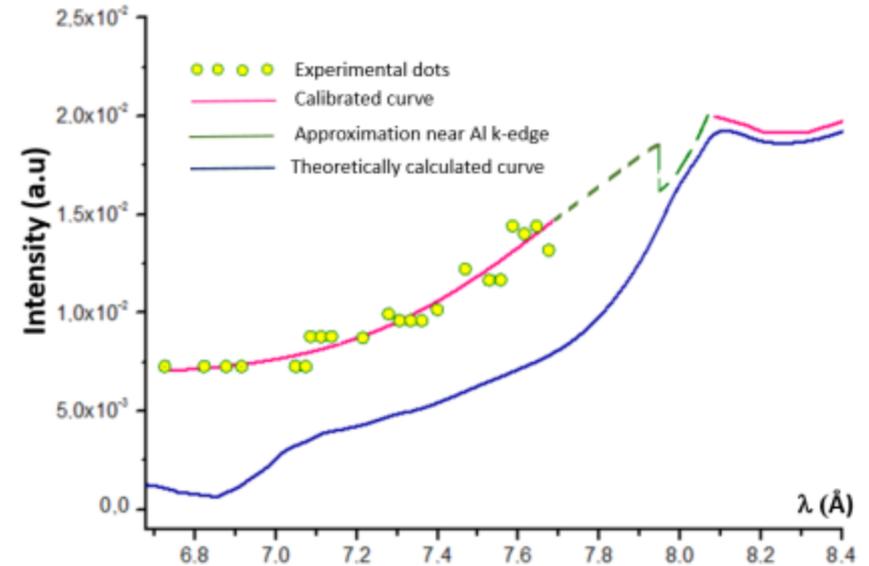
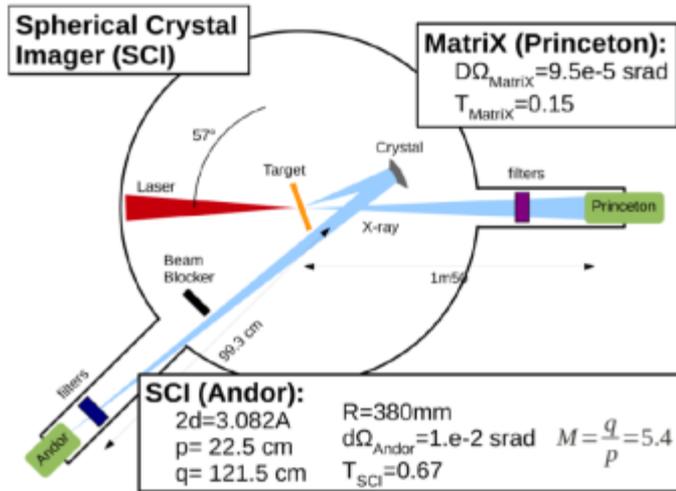
*Users' friendly interface*



# Bent crystal reflectivity calibration

R380 spherical quartz crystal calibration

R150 spherical mica crystal reflectivity



# Multicharged ion spectra Internet Database SPECTR-W3

[spectr-w3.snz.ru](http://spectr-w3.snz.ru)

**SPECTR***w*<sup>3</sup>

ATOMIC DATABASE Spectr-W<sup>3</sup> FOR PLASMA SPECTROSCOPY AND OTHER APPLICATIONS

[Ionization potentials](#)

[Energy levels](#)

[Spectral lines](#)

[Collisional data](#)

[Bibliography](#)

[Upload XSAMS XML](#)



## Spectral lines

*search in database*

**ATTENTION:**

1. In the wavelength range  $\lambda < 2000$  Ångstroms Spectr-W<sup>3</sup> lists only vacuum wavelengths  $\lambda = \lambda_{vac}$ . For longer wavelengths Spectr-W<sup>3</sup> lists either  $\lambda_{vac}$  or air wavelengths  $\lambda_{air}$  – as given by the contributing authors. For a few early data sources the distinction between  $\lambda_{vac}$  and  $\lambda_{air}$  has still to be made. Please, see the Comment field.

2. Because of cookies restrictions, browser remembers only up to 19 values of key form fields on this page!

[Mendeleyev's periodic table](#)

Enter search conditions:

Wavelength range (in Angstroms) : from :  to :  Å

Like :

Not :

Atom :

Isoelectronic sequence :

Nuclear charge :

Upper level

Configuration :  Term (2S+1), L, J:

Lower level

Configuration :  Term (2S+1), L, J:

## Spectral lines

Пример поиска:  
Спектральные линии  
Ne-подобного Cu

search results

Repeat search

Found records : 221

Num	Atom	Ion	Wavelength, Å	Upper level	Lower level	$A_{rad} s^{-1}$
1	Cu	Ne	10.638	$(2s2p^63p)^3P_1$	$(2p^6)^1S_0$	994000000000
2	Cu	Ne	10.582	$(2s2p^63p)^1P_1$	$(2p^6)^1S_0$	6590000000000
3	Cu	Ne	12.587	$(2p^53s)^3P_1$	$(2p^6)^1S_0$	1370000000000
4	Cu	Ne	12.839	$(2p^53s)^1P_1$	$(2p^6)^1S_0$	1650000000000
5	Cu	Ne	11.747	$(2p^53d)^3P_1$	$(2p^6)^1S_0$	1350000000000
6	Cu	Ne	11.596	$(2p^53d)^3D_1$	$(2p^6)^1S_0$	14100000000000

Задание формата  
выдачи результатов  
поиска

Output data:

- Atom
- Ion
- Znuc
- Zspec
- Wavelength
- Accuracy
- Transition
- Upper level
- Upper configuration
- 2Su+1
- Lu
- Ju
- Gu
- Lower level
- Lower configuration
- 2Sl+1
- LI
- Jl
- Gl
- Arad
- Oscillator strength
- Radiative width
- Autoionization width
- Satellite factor Qd
- Lower energy
- Upper energy

1) Zspec

Sort  
results  
records by :

2)

3)

Search

Reset

## Energy levels

Пример поиска:  
Энергии уровней <sup>2</sup>D  
Li-подобного Ar

search results

Repeat search

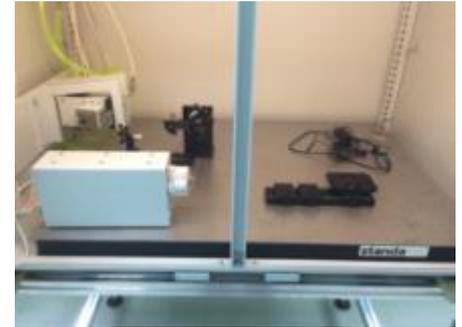
Found records : 32

Num	Atom	Ion	Level name	Configuration	M	L	J	G	Energy, cm <sup>-1</sup>	Ground state	Ground configuration	Radiative width	Autoionization width	Ionization potential, eV	Method	Reference
1	Ar	Li	$(1s^23d)^2D_{3/2}$	1s(2)3d	2	D	3/2		4281130	$(1s^22s)^2S_{1/2}$	1s(2)2s			918.391	Thr	<a href="#">R005</a>
2	Ar	Li	$(1s^23d)^2D_{3/2}$	1s(2)3d	2	D	3/2		4281160	$(1s^22s)^2S_{1/2}$	1s(2)2s			919.95	Semp	<a href="#">R003</a>
3	Ar	Li	$(1s^23d)^2D_{3/2}$	1s(2)3d	2	D	3/2		4282350	$(1s^22s)^2S_{1/2}$	1s(2)2s			918.393	Semp	<a href="#">R039</a>
4	Ar	Li	$(1s^23d)^2D_{5/2}$	1s(2)3d	2	D	5/2		4282700	$(1s^22s)^2S_{1/2}$	1s(2)2s			918.446	Thr	<a href="#">R004</a>

# Приборный парк

**Рентгенографическая установка “ПРДУ-02”  
с набором рентгеновских трубок, гониометров и  
рентгеновских детекторов**

*Прецизионная калибровка рентгеновских кристаллов и  
рентгенооптических элементов, изучение отражательных и  
дифракционных свойств изогнутых кристаллов.*

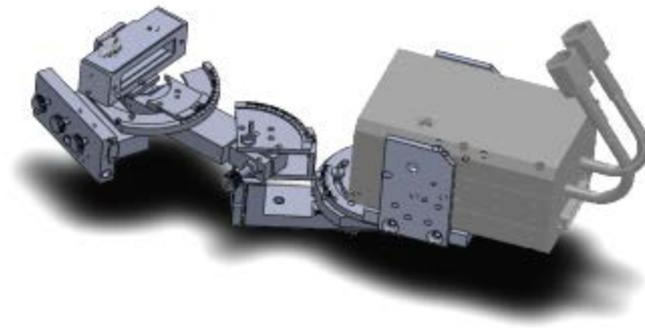


**Высокоразрешающий инфракрасный конфокальный  
измерительный комплекс для диагностики короткоживущих  
наноструктур в составе:**

- **Лазерный сканирующий конфокальный оптический  
микроскоп Carl Zeiss LSM700**
- **Вакуумная рентгеновская ПЗС камера Princeton  
Instruments MTE:2048**
- **Набор моторизованных гониометров Thorlabs**



**Фокусирующие рентгеновские спектрометры с  
пространственным разрешением (ФСР-1Д/2Д)  
с комплектом кристаллических диспергирующих  
элементов**



# Facilities in use for our research

## High energy ns/ps beams and their combinations

Vulcan PW, Rutherford Appleton Laboratory, UK

Titan, Lawrence Livermore National Laboratory, USA

PICO2000 +ELFIE, LULI Ecole Polytechnique CNRS, France

PHELIX, Gesellschaft für Schwerionenforschung, Germany

ELF facility NRNU MEPhI, Russia

Laser MegaJoule, CEA academic access-2018, France

## PW/multiTW-class fs lasers

PEARL, Institute for Applied Physics RAS, Russia

J-KAREN PW, Kansai Photon Science Institute JAEA, Japan

ILIL/ILIL-PW, Istituto per i Processi Chimico-Fisici CNR, Italy

CELIA, Bordeaux University CEA, France

Vega-3 CLPU, University of Salamanca, Spain

XL-III, Institute of Physics CAS, China

## Free-electron X-ray lasers

SACLA XFEL combined with HERMES, RIKEN Spring-8, Japan

European XFEL HED beamline, Germany

# The Team



**Anatoly Ya. Faenov**  
chief scientist,  $h = 36$   
JAEA award in 2010



**Igor Yu. Skobelev**  
leading scientist  
 $h = 27$



**Tatiana A. Pikuz**  
senior scientist,  $h = 35$ ,  
JAEA award in 2010



**Irina A. Zhvania**  
senior scientist,  
PhD from MSU, 2014



**Nikolay M. Nagorkiy**  
senior scientist,  
PhD from MSU, 2011



**Maria A. Alkhimova**  
PhD student @MEPhI  
RF President stipend.



**Eugeny D. Filippov**  
PhD student @MEPhI,  
RF President stipend.



**Sergey N. Ryazantsev**  
PhD student @MSU



**Sergey S. Makarov**  
M. student @MSU



**Georgy V. Pokrovskiy**  
B. student @MIPT,  
Top10 MIPT students

# Персональные достижения 2010-2015

## Премии и награды:

- Пикуз С.А. - Премия Правительства Москвы для молодых ученых за 2014 г.
- Фаенов А.Я.  
Пикуз Т.А. - Награда Японского агентства по атомной энергии  
2010 г.
- Алхимова М.А. - Стипендия Президента РФ (2013-2014),  
- Именная стипендия от ГК РОСАТОМ (2013),
- Филиппов Е.Д. - Стипендия Президента РФ (2013-2014)

## Защищенные диссертации:

- Жвания И.А. - к.ф.-м.н., защита в ноябре 2014 г.

# Публикации 2010-2015

Всего статей WoS	IP > 5	5 > IP > 2
97	10	32
	<b>Science Nature Comm. Phys.Rev.Lett. Sci.Reports</b>	УФН Opt.Express Appl.Phys.Lett. Phys.Rev.E Opt. Lett. Phys. Plasmas Plasma Phys.Control.Fusion Astophys.Space Sci. J.Phys.D J.Appl.Phys. J.Phys.B J. Microscopy New J.Phys.

## Монография

Фундаментальные космические исследования. В 2 кн. Кн. 1. Астрофизика  
/Под науч. ред. Г.Г. Райкунова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 452 с.  
ISBN 978-5-9221-1549-0.