

Диагностика лазерных импульсов сверхвысокой интенсивности при помощи туннельной ионизации тяжелых атомов

С. Попруженко

Институт общей физики им. А.М. Прохорова



M. Ciappina, S Weber

S. Bulanov, G. Korn

ELI-Beamlines, Czech Republic



Е. Пеганов

Национальный исследовательский ядерный
университет МИФИ



T. Ditmire

University of Texas at Austin, USA



Outline

- Сверхвысокие интенсивности: что нужно, что сейчас есть и что ожидается
- Проблема измерения интенсивности в фокусе
- Диагностика при помощи туннельной ионизации: модель и результаты расчетов
- Возможная постановка эксперимента
- Другие перспективные схемы
- Итоговые замечания

Интенсивность

$$\mathcal{I} = \frac{c\mathcal{E}_0^2}{8\pi}$$

Пиковая интенсивность, W/cm^2

10^{14}

10^{18}

10^{21}

10^{23}

10^{24}

10^{25}

10^{27}

Нелинейная атомная оптика

Релятивистские электроны

Ускорение протонов до десятков МэВ

Преобладание силы радиационного трения

Квантовый режим излучения

Релятивистские протоны
Квантовые каскады

Пробой вакуума – рождение пар

Инвариантные параметры

$$a_0 = \frac{eE_0}{mc\omega} \simeq \frac{p}{mc} \quad a_0 \gg 1 \quad 10^{18} \text{ W/cm}^2$$

$$P = \frac{2e^2w_0^2}{3c^3} = -\frac{2}{3}e^2c \frac{du^\mu}{ds} \frac{du_\mu}{ds} \quad \frac{P_\tau}{\mathcal{E}} = \frac{P_\tau}{\gamma mc^2} \simeq 1$$

10^{23} W/cm^2

$$\chi = \frac{e\hbar}{m^3c^4} \sqrt{-(F^{\mu\nu}p_\nu)^2} \quad \chi \simeq 1 \quad 10^{25} \text{ W/cm}^2$$

Сейчас...

$$\mathcal{I} = \frac{c\mathcal{E}_0^2}{8\pi}$$

Пиковая интенсивность, W/cm^2

10^{14}

10^{18}

10^{21}

10^{23}

10^{24}

10^{25}

10^{27}

Нелинейная атомная оптика

Релятивистские электроны

Ускорение протонов до десятков МэВ

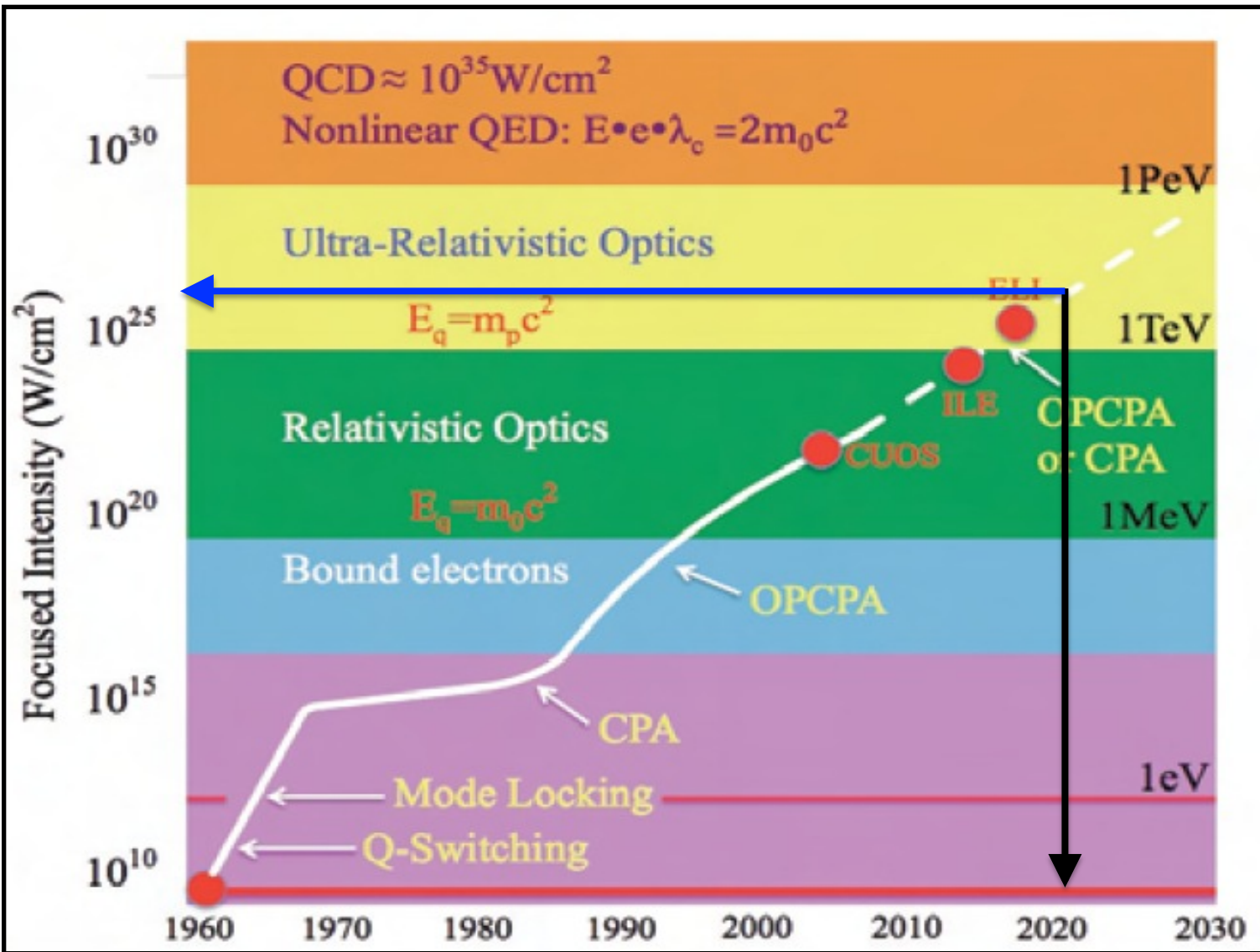
Преобладание силы радиационного трения

Квантовый режим излучения

Релятивистские протоны
Квантовые каскады

Пробой вакуума – рождение пар

Динамика роста пиковой интенсивности лазерного излучения

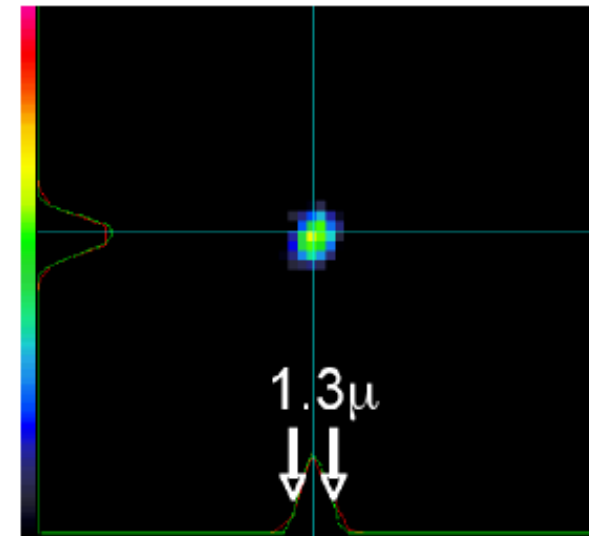


Достигнутые значения

Размер пятна D	1PW	3PW	10PW
100 μm	$10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$	$3 \cdot 10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$	$10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$
10 μm	$10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$	$3 \cdot 10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$	$10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$
1.3 μm	$7 \cdot 10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$	$2 \cdot 10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$	$7 \cdot 10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$

V. Yanovsky et al., Opt. Exp. 2008

$2 \cdot 10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$



b)

Новые сверхмощные лазеры: от 1ПВт к 10ПВт и далее...

- **Extreme Light Infrastructure**
Czech Republic – Hungary - Romania
- **Gwanju Institute of Science and Technology**
Republic of Korea
- **Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility**
China
- **Exawatt Center for Extreme Light Studies**
Russia

Superintense Laser Facility – SULF

Шанхай – 5.4ПВт сейчас



Extreme Light Infrastructure – ELI

Чехия–Венгрия–Румыния – до 10ПВт

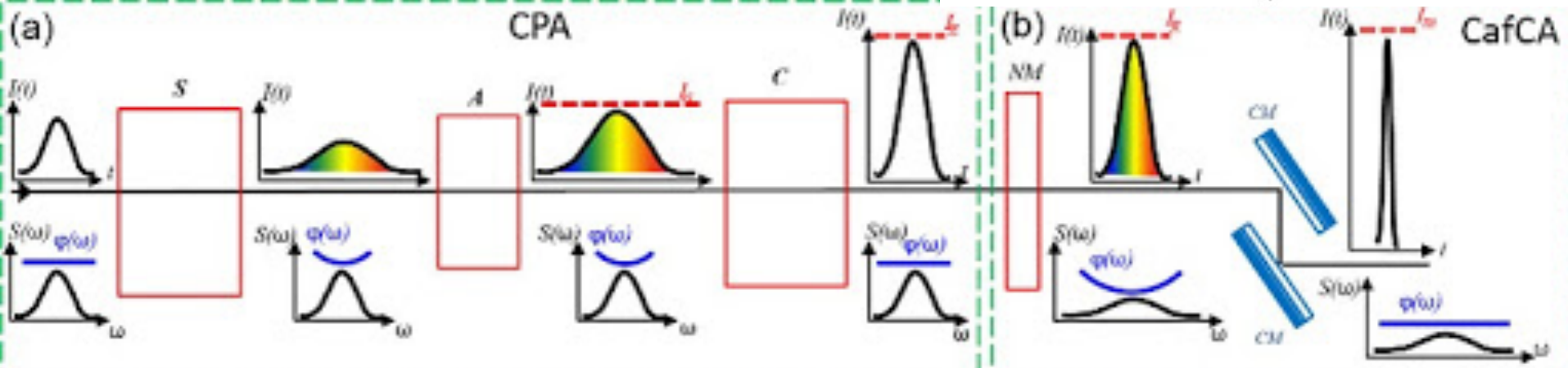
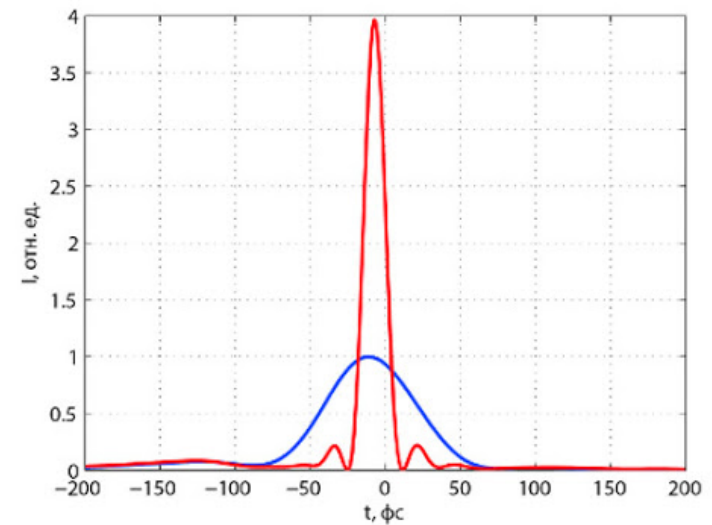
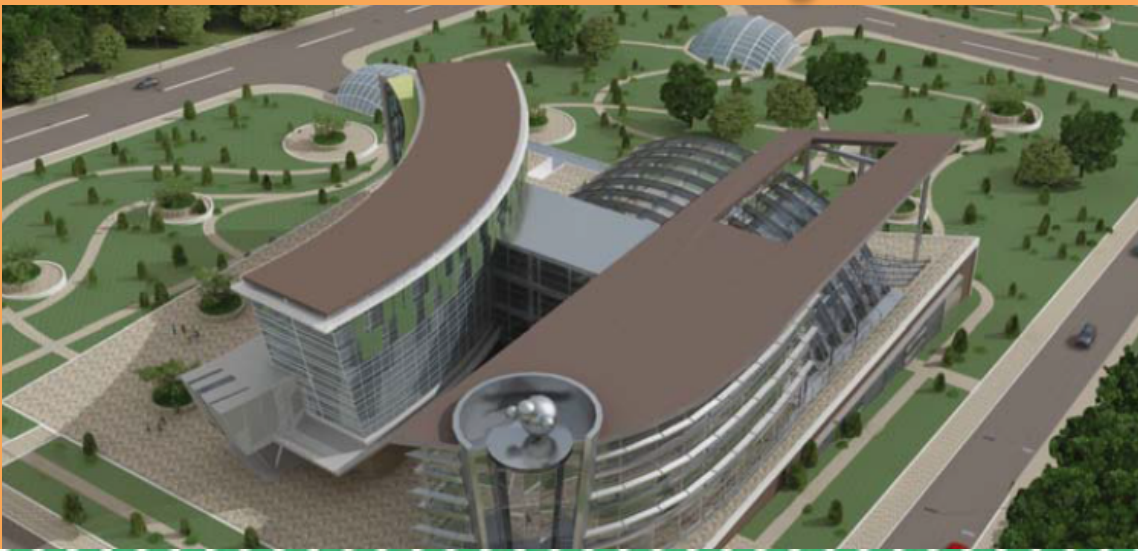


**Arrollon, Франция – 1ПВт сейчас,
затем до 10ПВт**



PEARL + CafCA

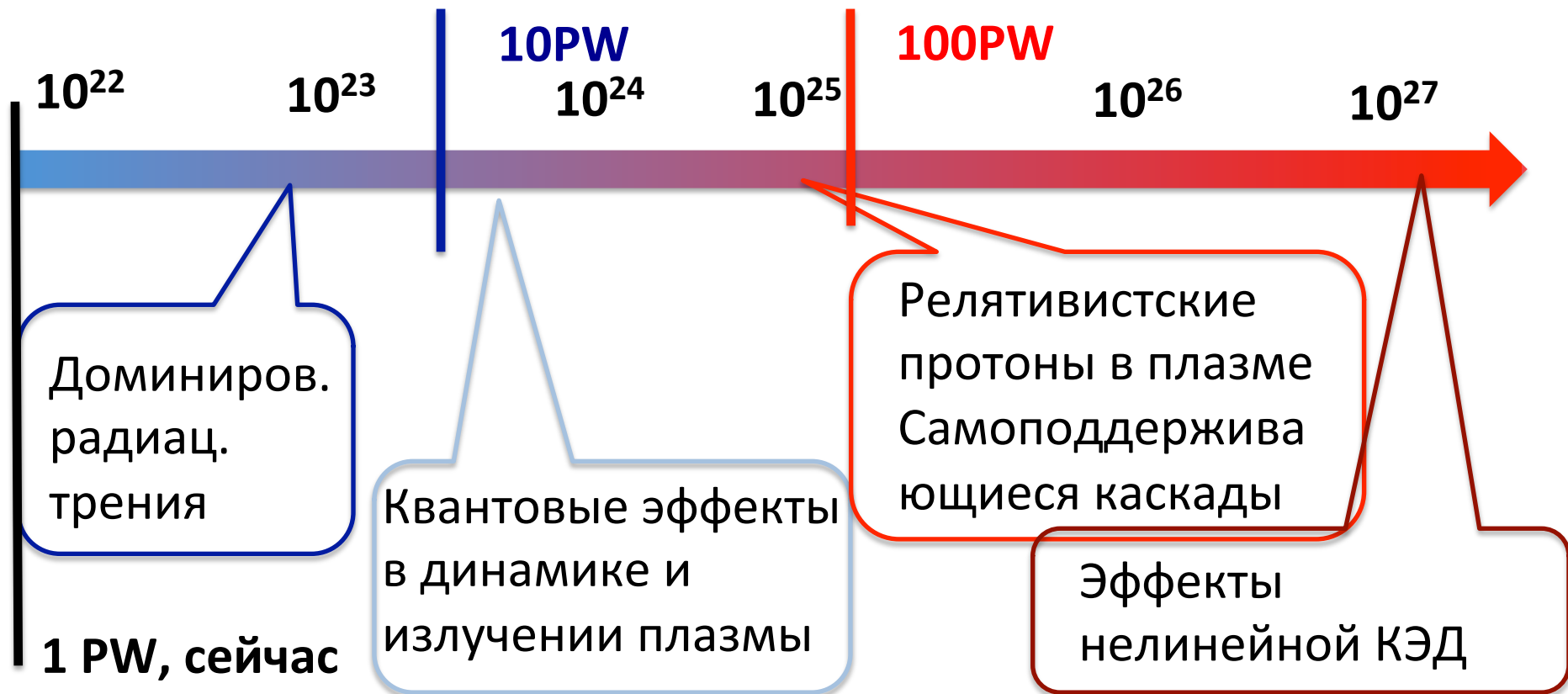
Exawatt Center for Extreme Light Studies – XCELS, Нижний Новгород



От петаватт к эксаваттам

D	P=3PW	P=10PW	P=100PW
100μm	$3 \cdot 10^{19} \text{W/cm}^2$	10^{20}W/cm^2	10^{21}W/cm^2
10μm	$3 \cdot 10^{21} \text{W/cm}^2$	10^{22}W/cm^2	10^{23}W/cm^2
1.3μm	$2 \cdot 10^{23} \text{W/cm}^2$	$6 \cdot 10^{23} \text{W/cm}^2$	$6 \cdot 10^{24} \text{W/cm}^2$

$$I_{\max} \approx \frac{W}{\tau D^2} \approx \frac{P}{D^2}$$

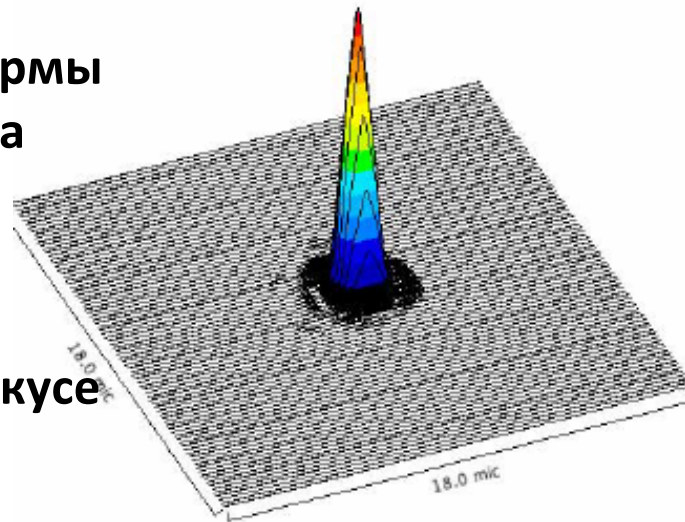


Знаем ли мы интенсивность в фокусе?

Размер пятна D	1PW	3PW	10PW
100 μm	$10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$	$3 \cdot 10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$	$10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$
10 μm	$10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$	$3 \cdot 10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$	$10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$
1.3 μm	$7 \cdot 10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$	$2 \cdot 10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$	$7 \cdot 10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$

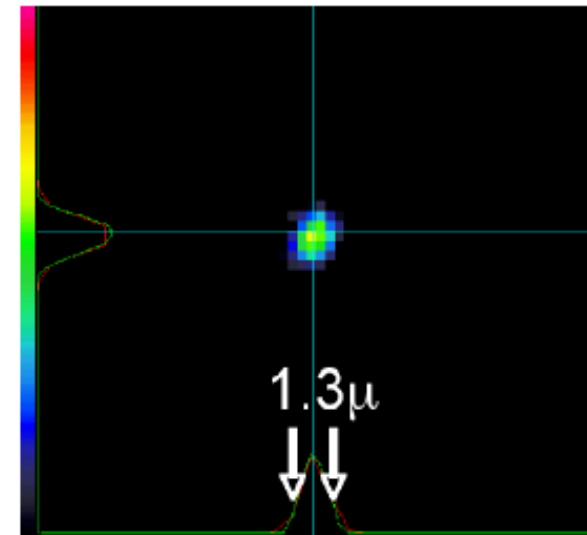
(a) Расчетное

распределение,
найденное из формы
волнового фронта
при малой
интенсивности



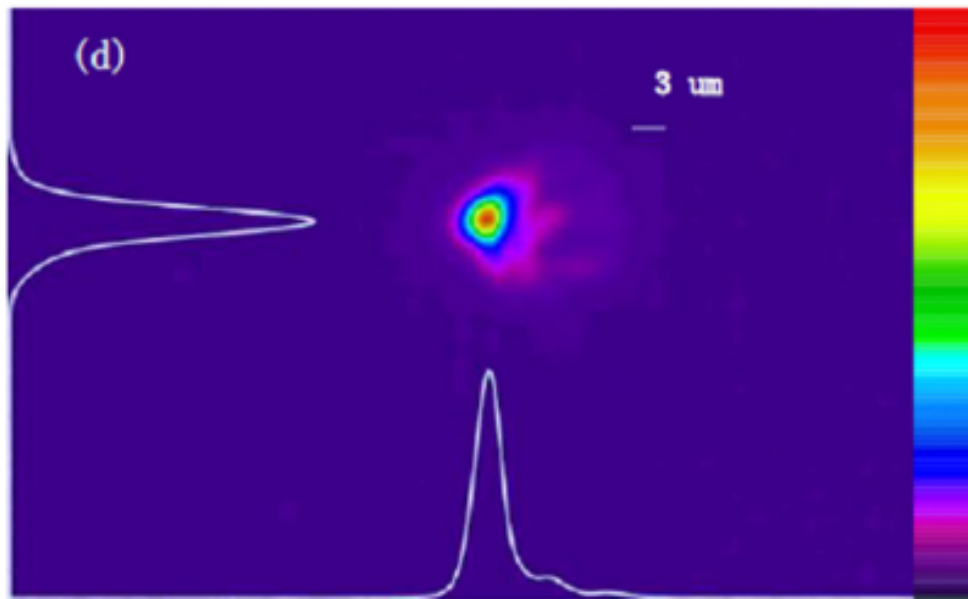
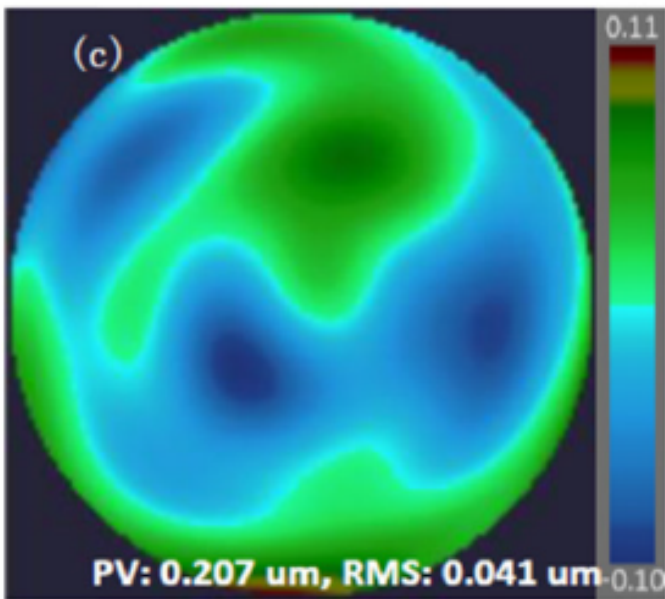
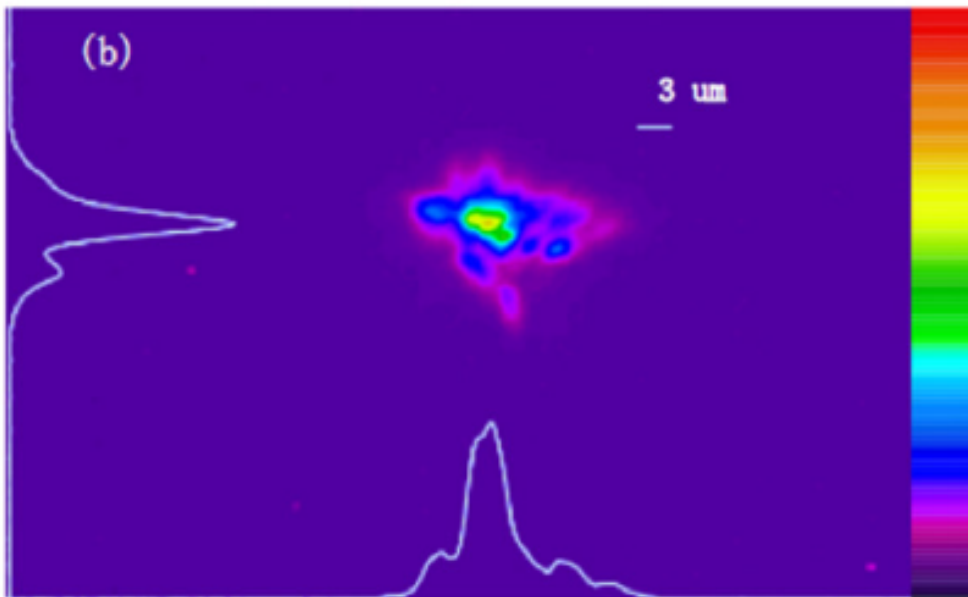
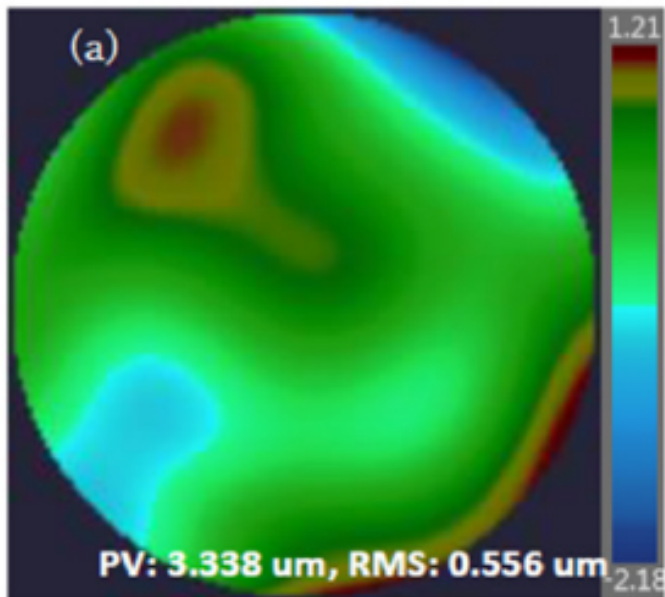
a)

(b) Измеренное в фокусе при малой интенсивности



b)

Коррекция волнового фронта

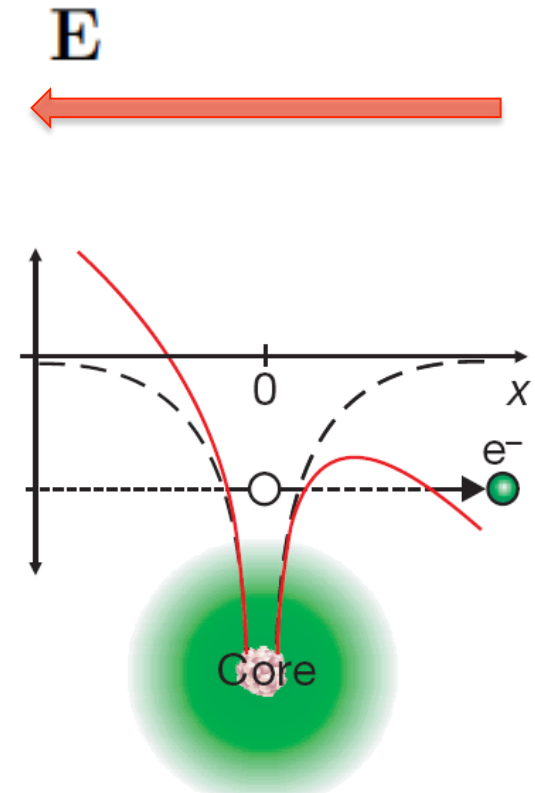


Задача:

разработать надежный способ
прямого измерения интенсивностей
в фокусе экстремально мощных
лазеров

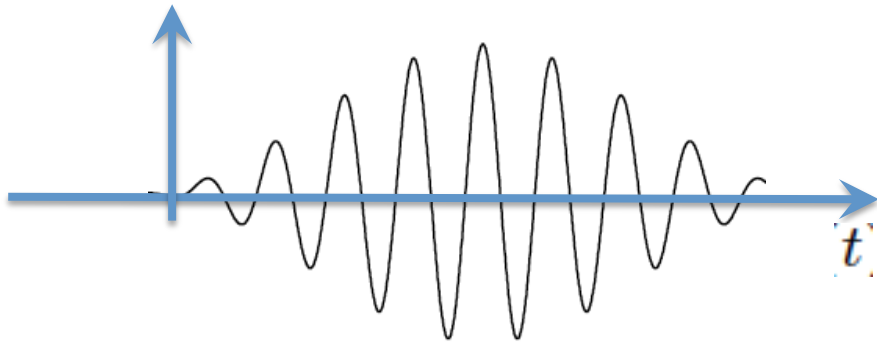
Туннельная ионизация тяжелых атомов

- Вероятность определяется локальным значением поля
- Чувствительна к максимальному значению напряженности поля и гораздо меньше – к длительности импульса
- Сильно нелинейная зависимость вероятности от интенсивности
- Электроны туннелируют последовательно, корреляционные эффекты малы

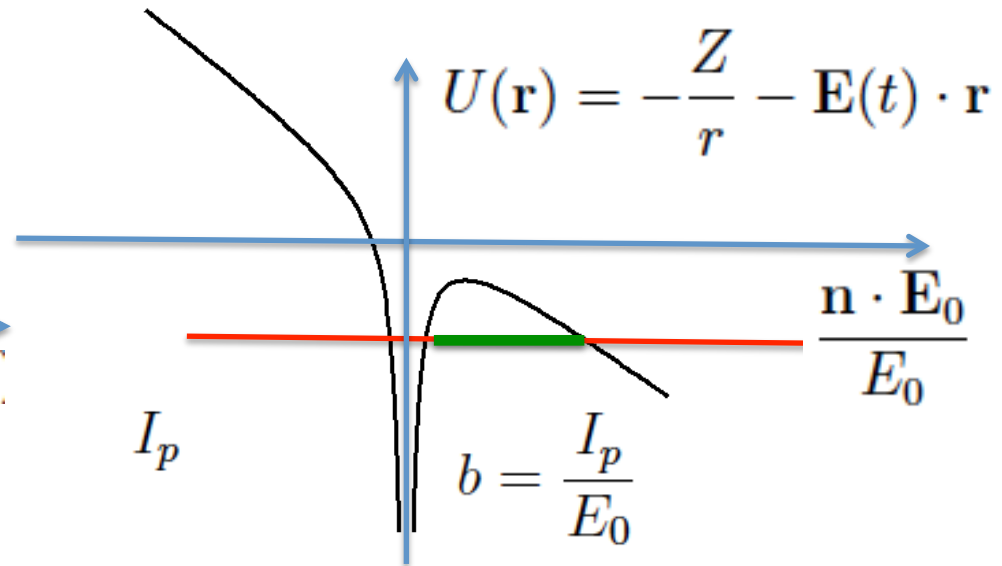


Нерелятивистская туннельная ионизация

$$E(t) = E_0 f(t) \sin(\omega t)$$



$$\gamma = \frac{\sqrt{2I_p\omega}}{E_0}$$



L.V. Keldysh, 1964

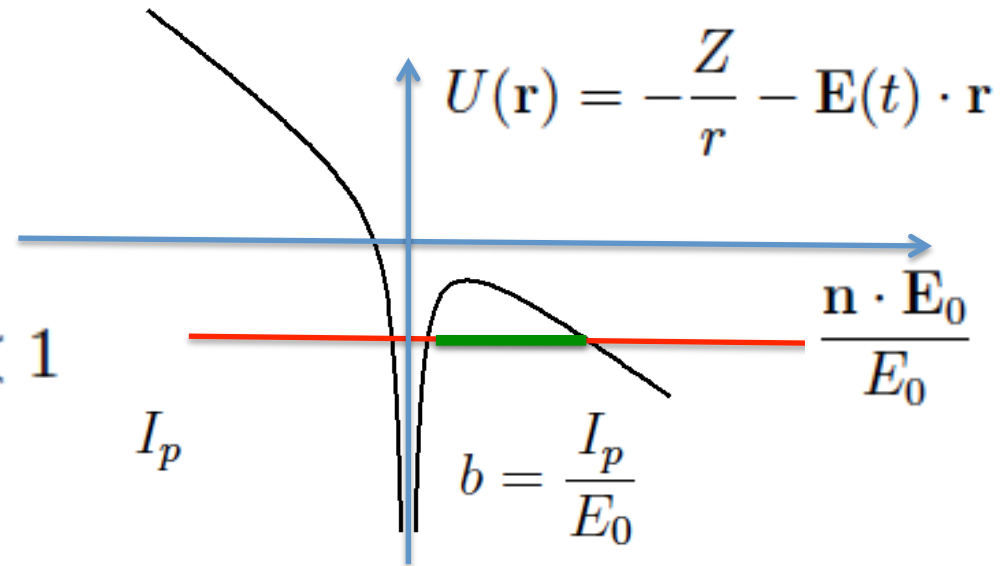
A.I. Nikishov, V.I. Ritus, 1966-67

A.M. Perelomov, V.S. Popov, M.V. Terentyev 1966-67

Нерелятивистская туннельная ионизация

$$\gamma = \frac{\sqrt{2I_p\omega}}{E_0}$$

$$\gamma = 3 \cdot 10^{-2} \div 1.5 \cdot 10^{-3} \ll 1$$



$$w(F, \nu, l, m, I_p; t) = 2^{2\nu+1} C_{\kappa l}^2 B_{lm} I_p F^{1+|m|-2\nu}(t) \exp \left\{ -\frac{2}{3F(t)} \right\}$$

$$F = \frac{E_0}{(2I_p)^{3/2}} \quad \nu = \frac{Z}{\sqrt{2I_p}}$$

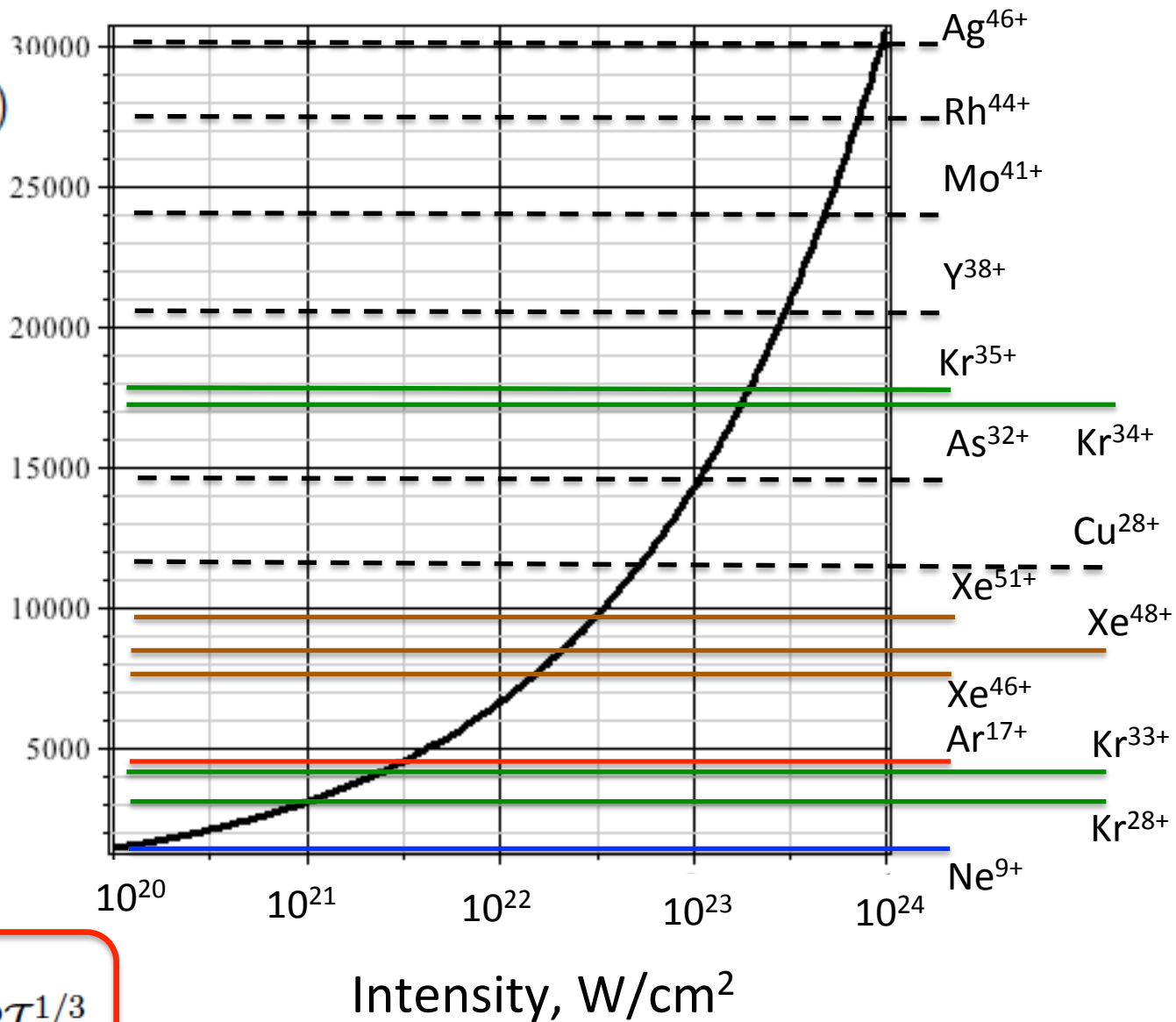
$$C_{\nu l}^2 = \frac{2^{2\nu-2}}{\nu \Gamma(\nu + l + 1) \Gamma(\nu - l)} \quad B_{lm} = \frac{(2l + 1)(l + |m|)!}{2^{2|m|} |m|! (l - |m|)!}$$

Интенсивность насыщения

$$E(t) = E_0 f(t) \sin(\omega t)$$

$$\frac{2\pi}{\omega} \omega \approx 1$$

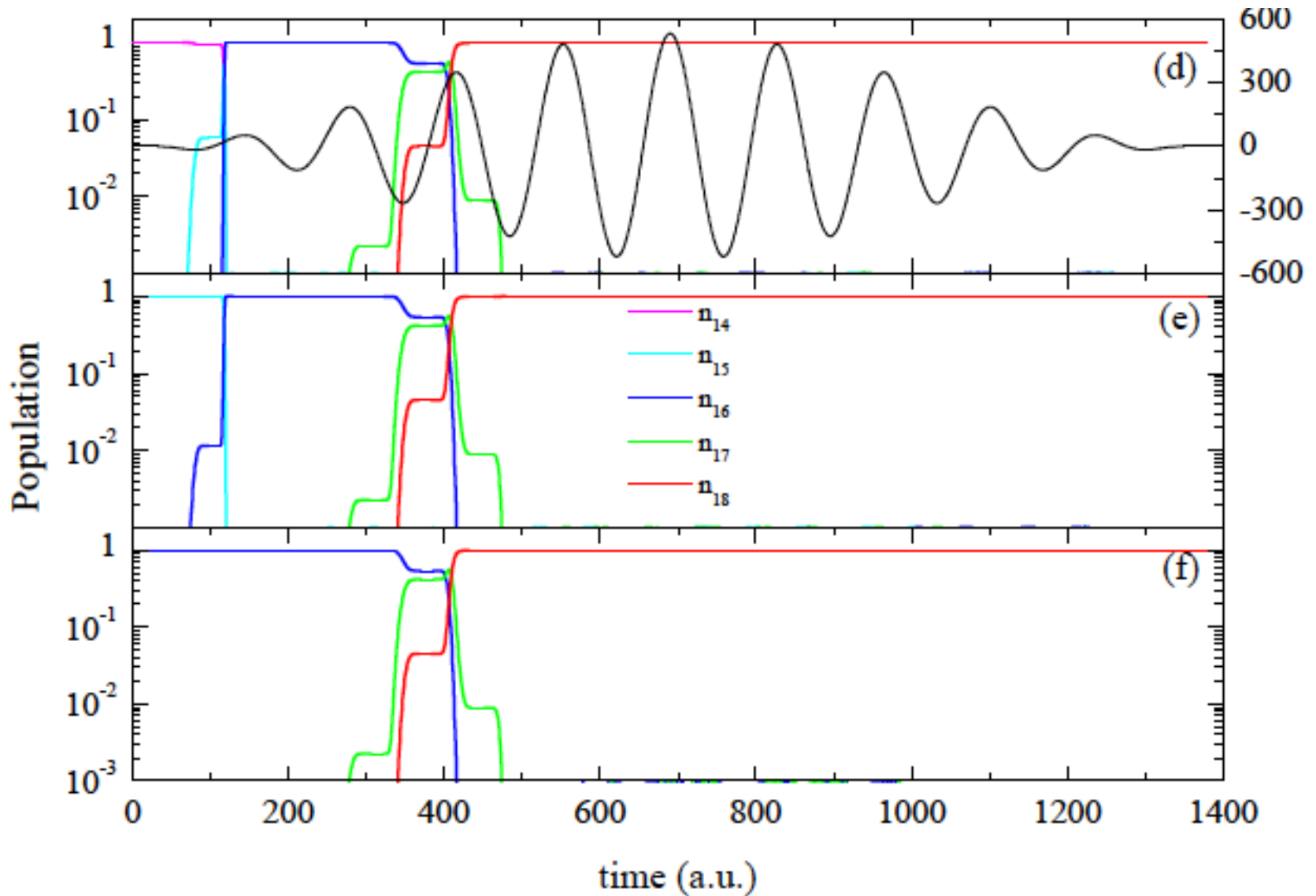
Ionization potential, eV



$$I_p^* \approx \frac{1}{2} (20E_0)^{2/3} \approx 52.2 \mathcal{I}^{1/3}$$

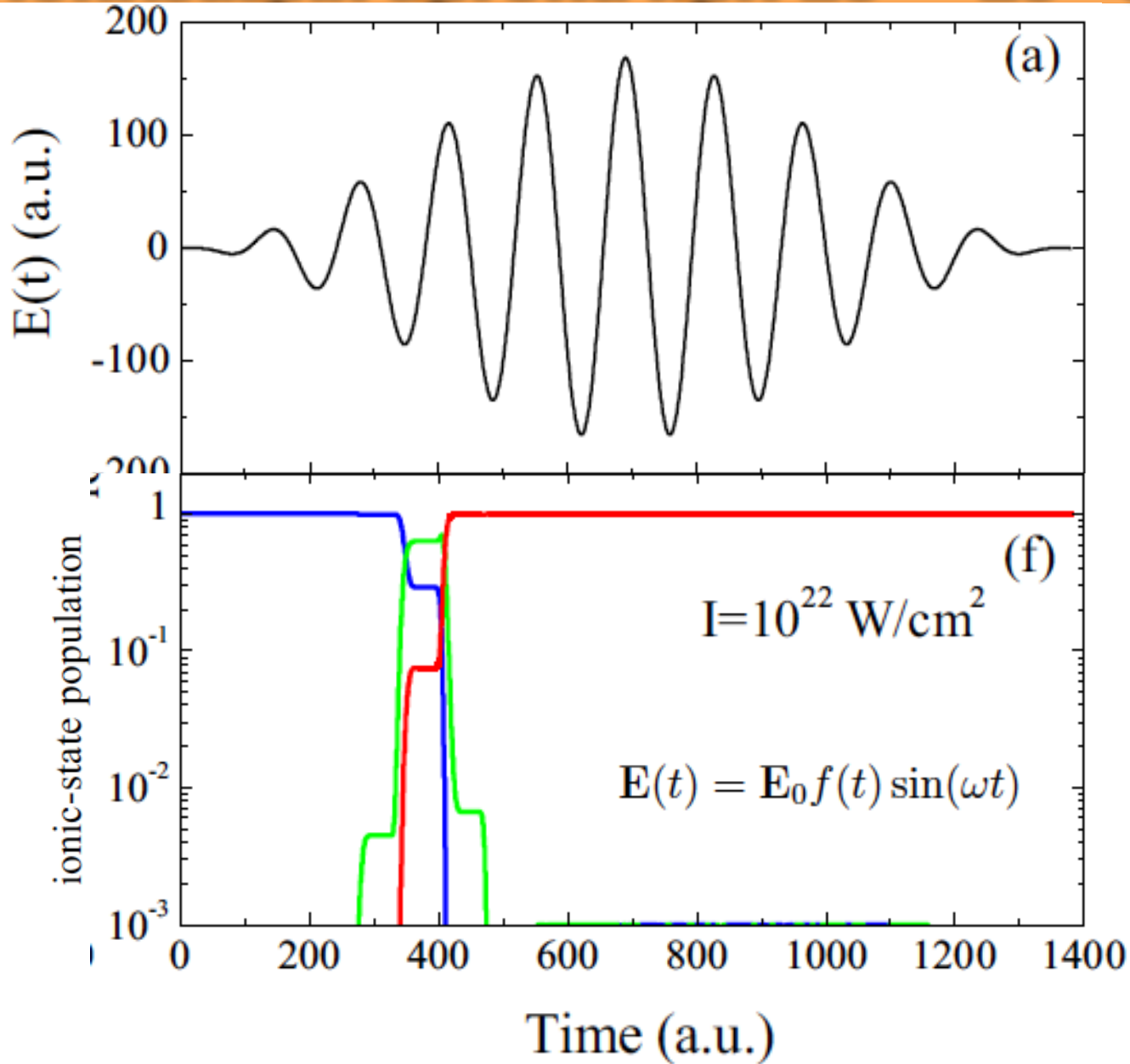
Ионизация аргона при 10^{19} – 10^{22} W/cm²

Ar¹⁴⁺

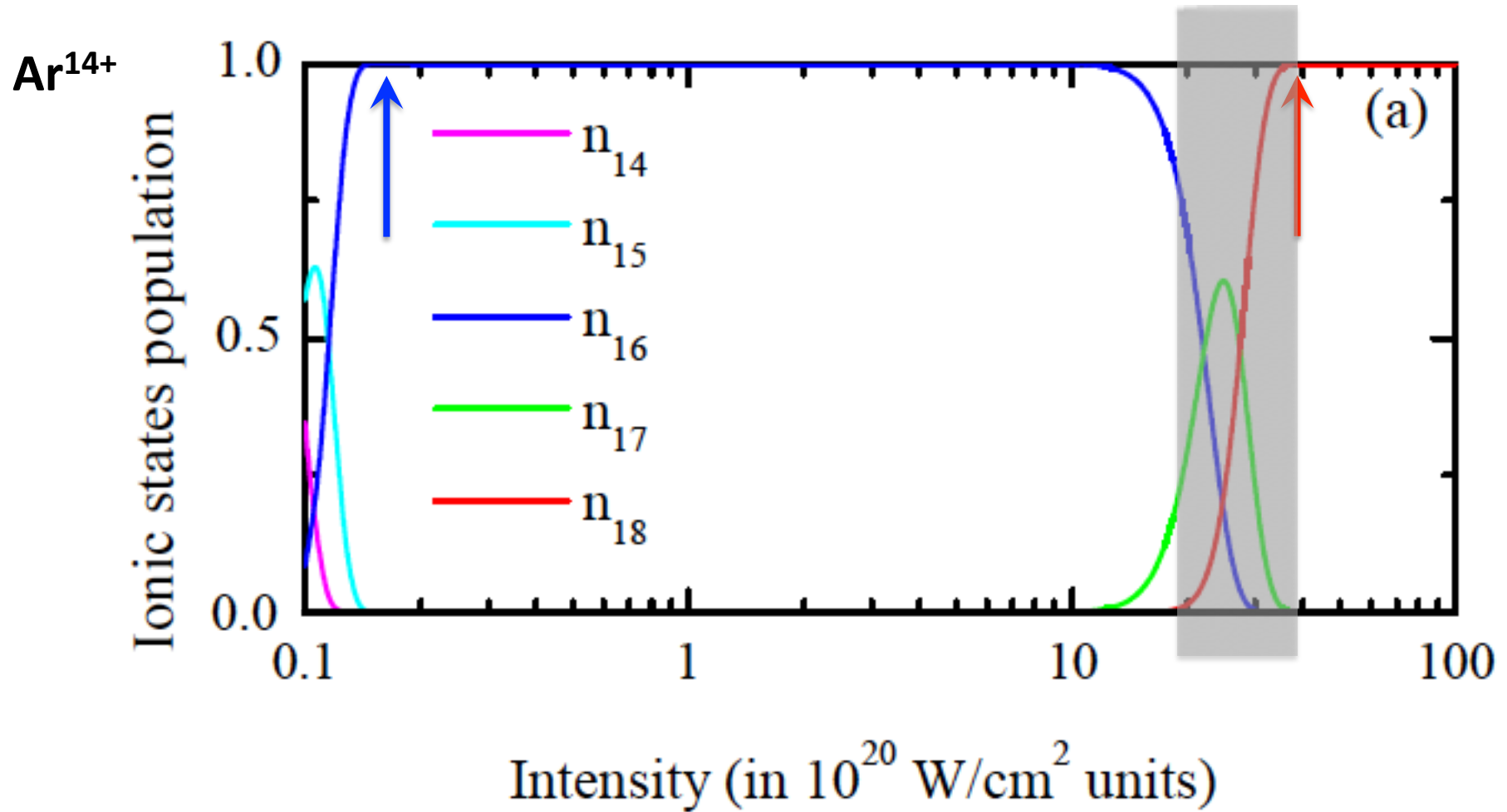


Ионизация аргона при 10^{19} – 10^{22} W/cm²

Ar¹⁶⁺

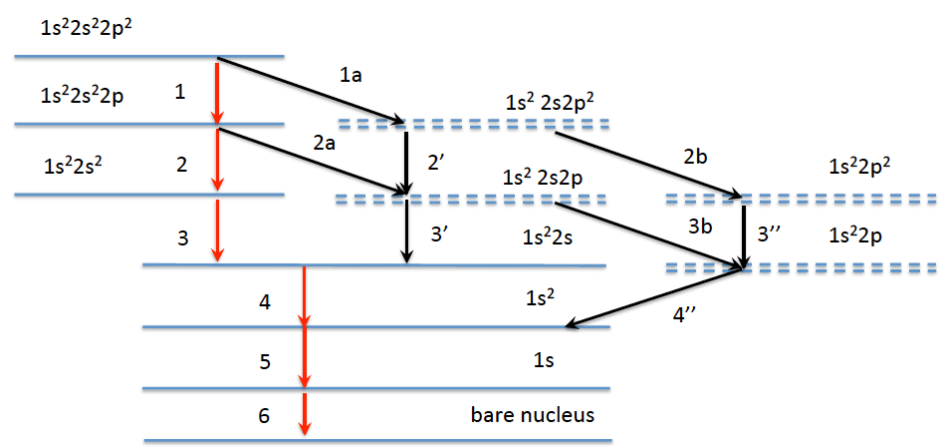
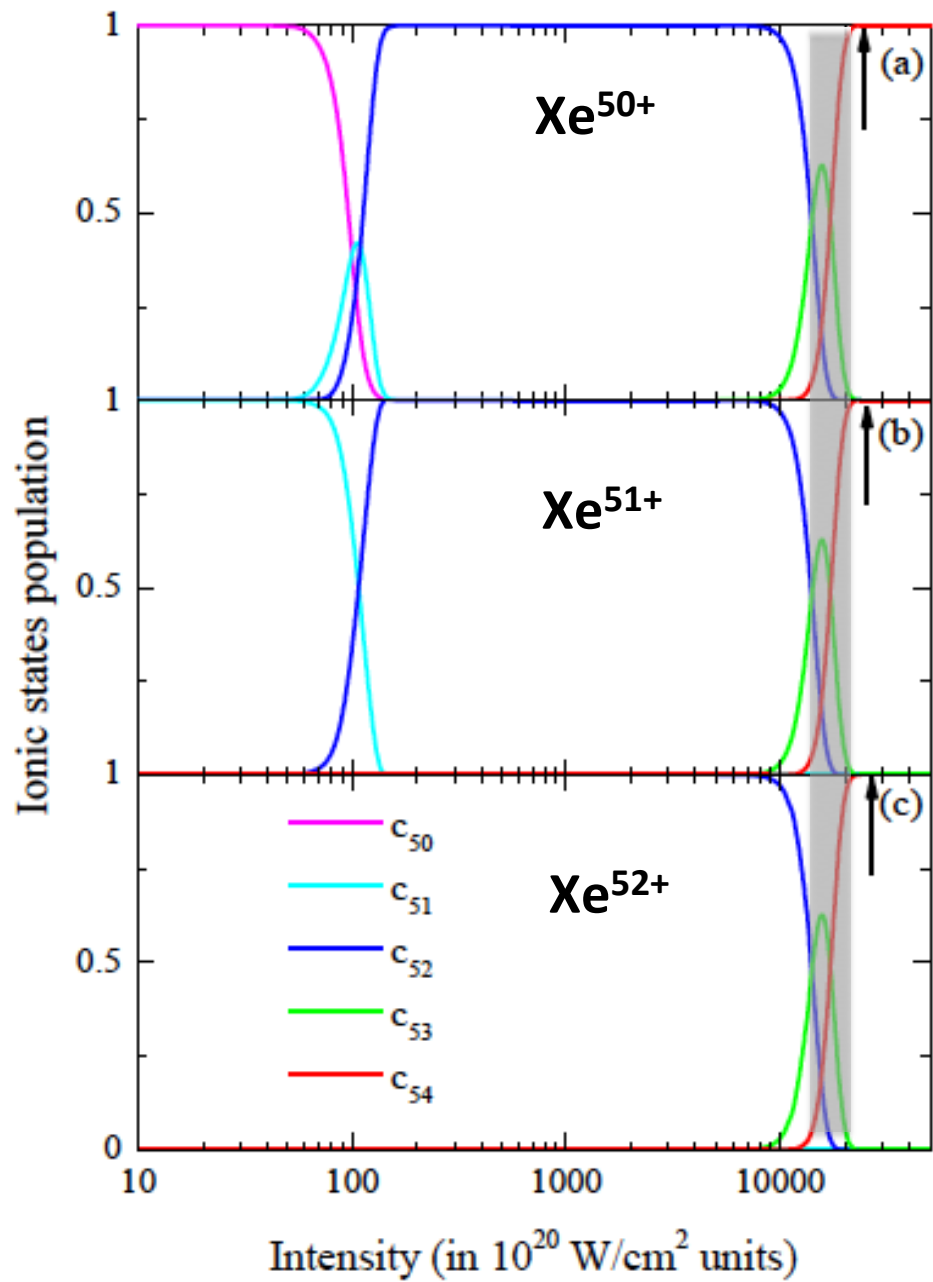


Ионизация аргона при 10^{19} – 10^{22} W/cm²

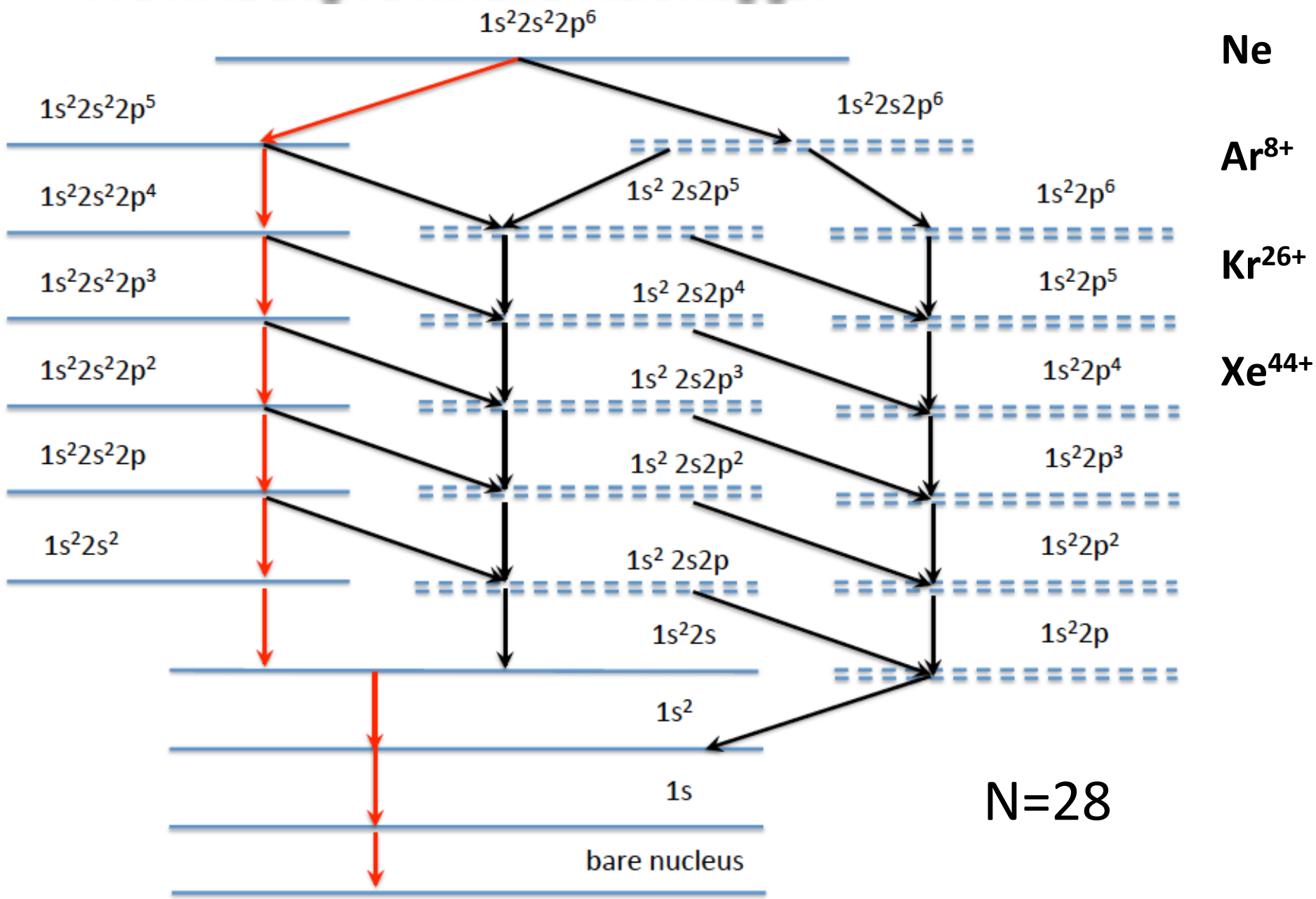


$$I^* \approx 7.03 \cdot 10^{-6} (I_p)^3 [10^{20}] \text{ W/cm}^2$$

Ионизация ксенона при 10^{21} – 10^{25} Вт/см²



Ионизационные каскады



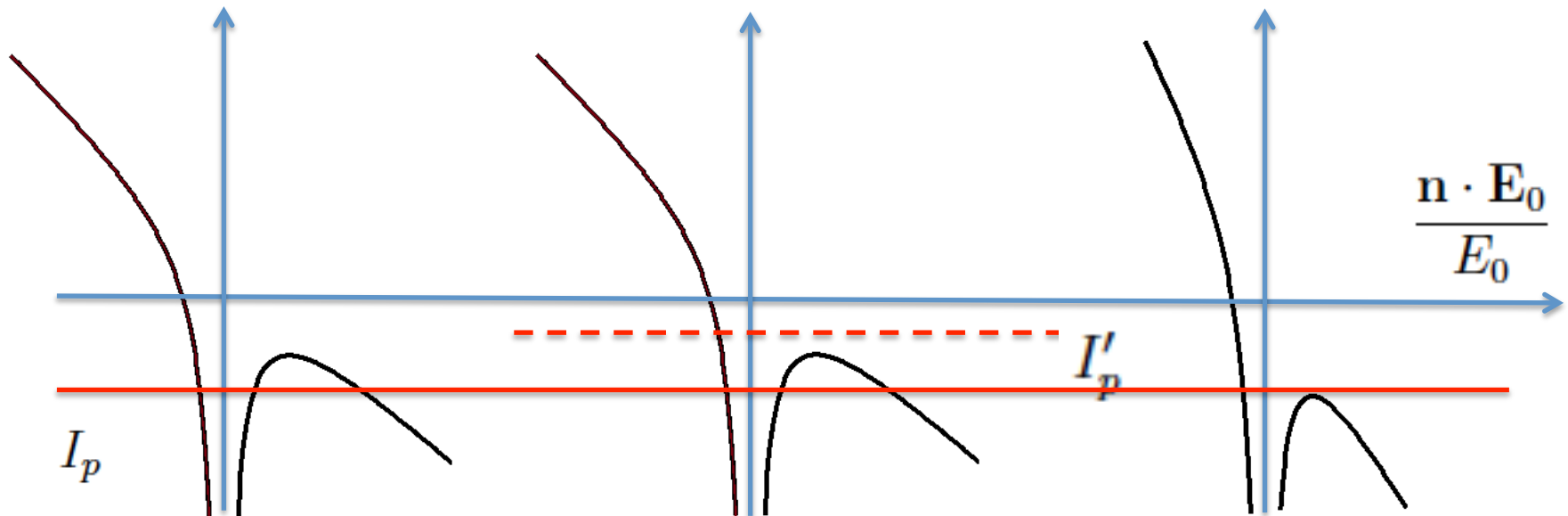
Какие состояния надежнее?

$$U(\mathbf{r}) = -\frac{Z}{r} - \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{r}$$

$$F_{\text{BS}} = \frac{1}{16\nu}$$

$$\nu = \frac{Z}{\sqrt{2I_p}}$$

$$F = \frac{E_0}{(2I_p)^{3/2}}$$



туннелирование

подавление барьера

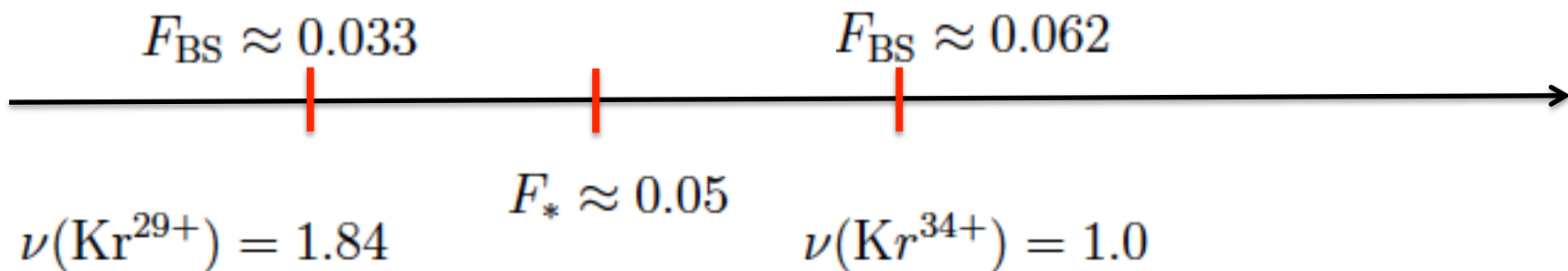
Tong & Lin, 2005

Artemenko & Kostyukov 2017

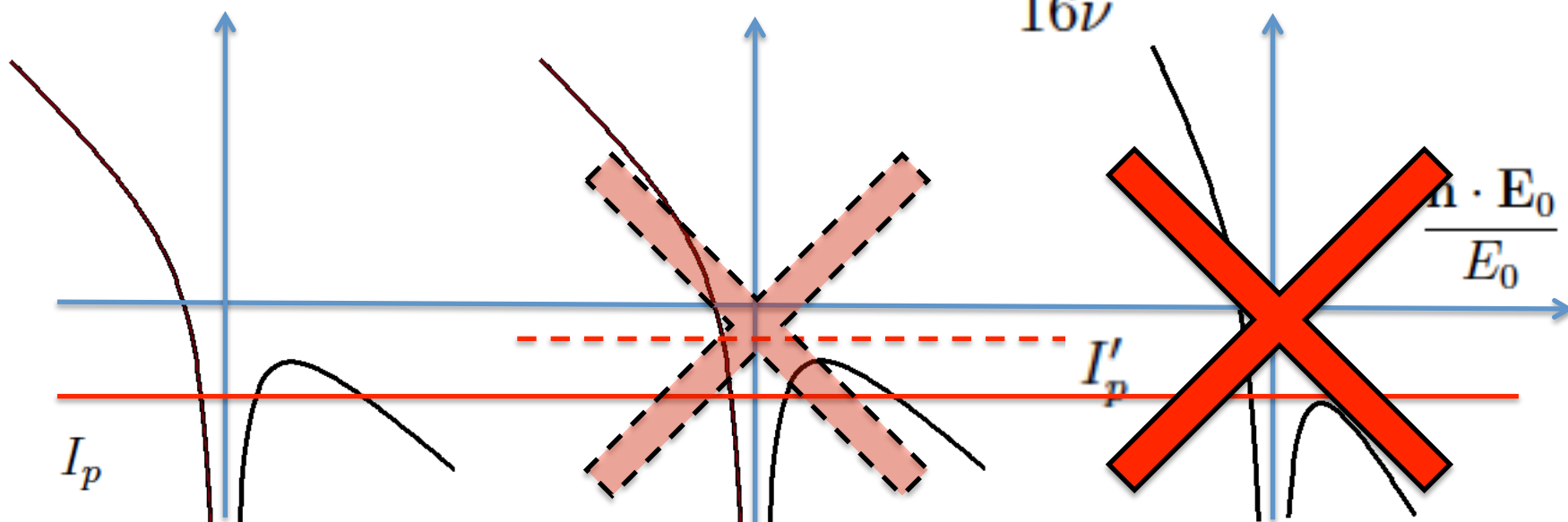
ионизация в сверхкоротких
сверхсильных импульсах

Kostyukov & Golovanov 2018

Какие состояния надежнее?



$$F_{BS} = \frac{1}{16\nu}$$



туннелирование

BSI

Усреднение по фокусу

- Гауссов TEM₀₀ импульс
- Одно из точных решений для фокусированного стационарного пучка
(Нарожный, Фофанов, 2000)

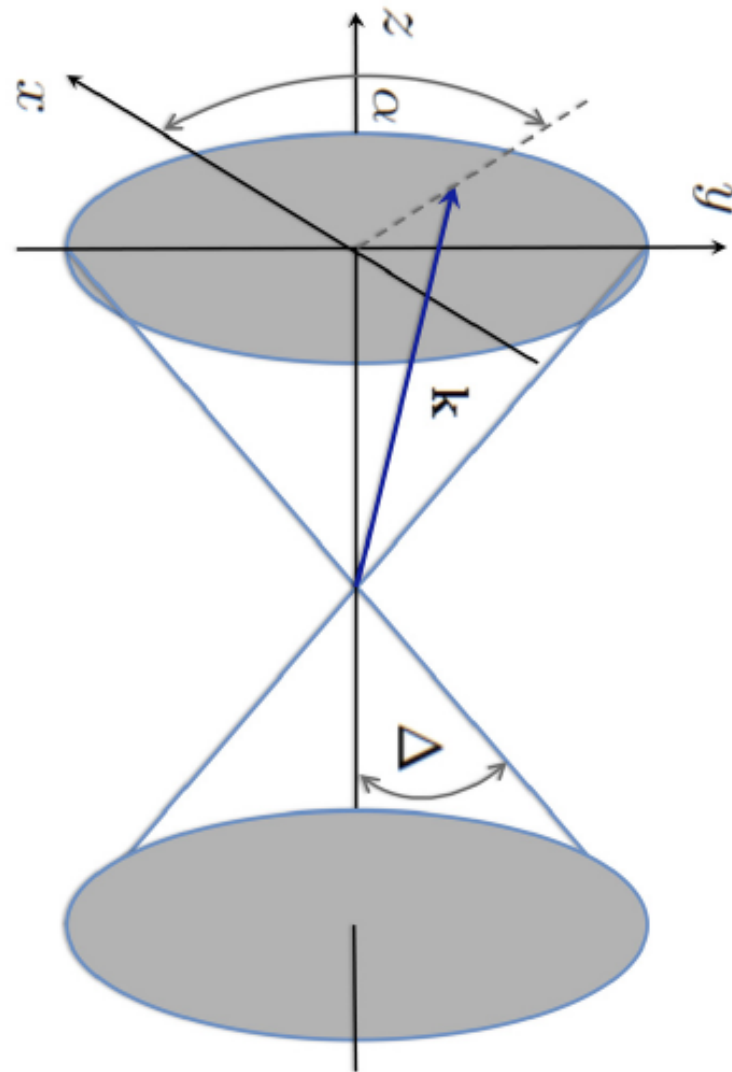
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{iE_0\Delta^2}{2\pi(1 - \cos \Delta)} \exp \left\{ -i\omega(t - z/c) \right\} \times$$

$$\times \int_{-\pi}^{+\pi} d\alpha \left[\sin^2 \alpha \mathbf{e}_x - \sin \alpha \cos \alpha \mathbf{e}_y \right] G(\nu, \chi, \Delta)$$

$$G(\nu, \chi, \Delta) = 2 \int_0^1 du f_1(u, \Delta) \exp \left\{ i\nu f_1(u, \Delta) - i\chi f_2(u, \Delta) \right\}$$

$$\nu = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} (x \cos \alpha + y \sin \alpha), \quad \chi = \frac{2\pi\Delta^2}{\lambda} z$$

$$f_1(u, \Delta) = \frac{\sin \Delta u}{\Delta}, \quad f_2(u, \Delta) = \frac{2 \sin^2 \left(\Delta u / 2 \right)}{\Delta^2}$$



Усреднение по фокусу

- Гауссов TEM₀₀ импульс
- Одно из точных решений для фокусированного стационарного пучка
(Нарожный, Фофанов, 2000)

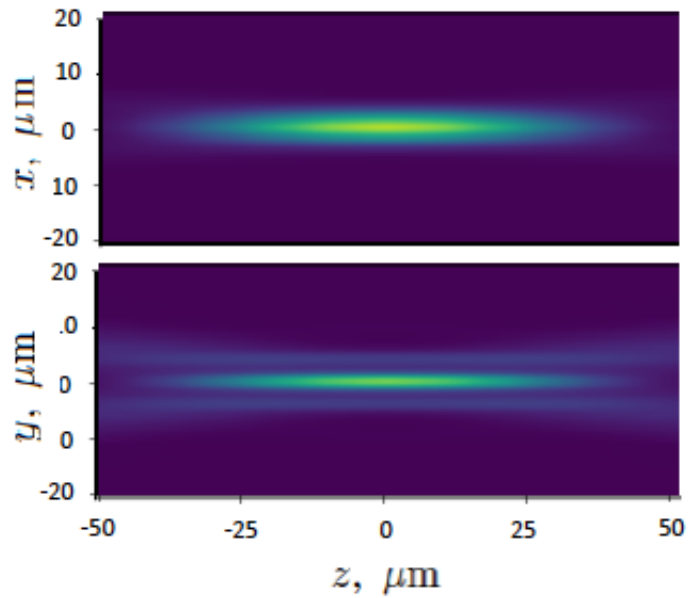
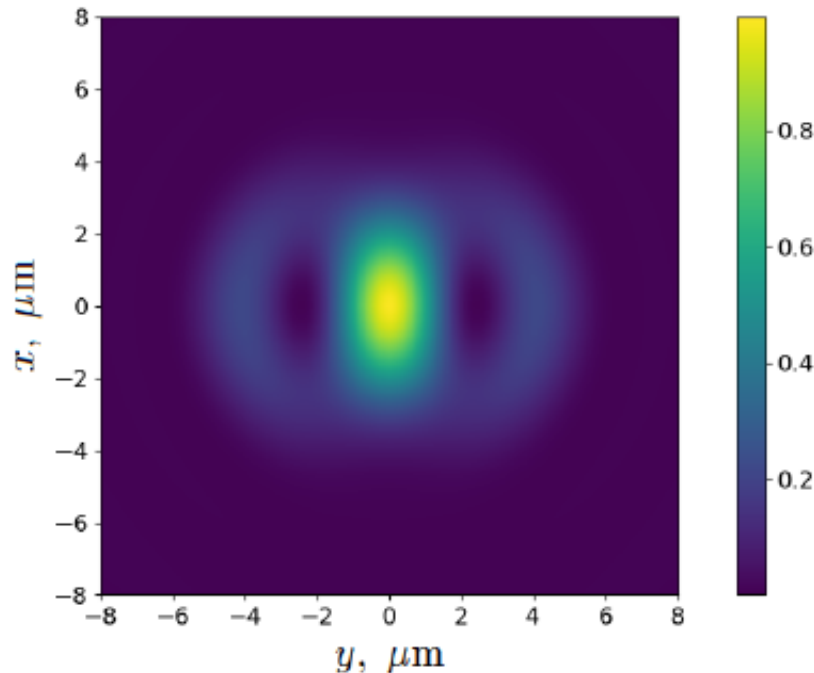
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{iE_0\Delta^2}{2\pi(1 - \cos \Delta)} \exp \left\{ -i\omega(t - z/c) \right\} \times$$

$$\times \int_{-\pi}^{+\pi} d\alpha \left[\sin^2 \alpha \mathbf{e}_x - \sin \alpha \cos \alpha \mathbf{e}_y \right] G(\nu, \chi, \Delta)$$

$$G(\nu, \chi, \Delta) = 2 \int_0^1 du f_1(u, \Delta) \exp \left\{ i\nu f_1(u, \Delta) - i\chi f_2(u, \Delta) \right\}$$

$$\nu = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} (x \cos \alpha + y \sin \alpha), \quad \chi = \frac{2\pi\Delta^2}{\lambda} z$$

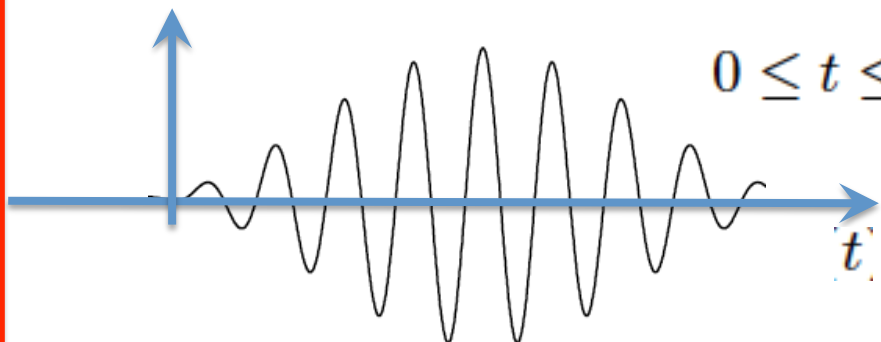
$$f_1(u, \Delta) = \frac{\sin \Delta u}{\Delta}, \quad f_2(u, \Delta) = \frac{2 \sin^2 \left(\Delta u / 2 \right)}{\Delta^2}$$



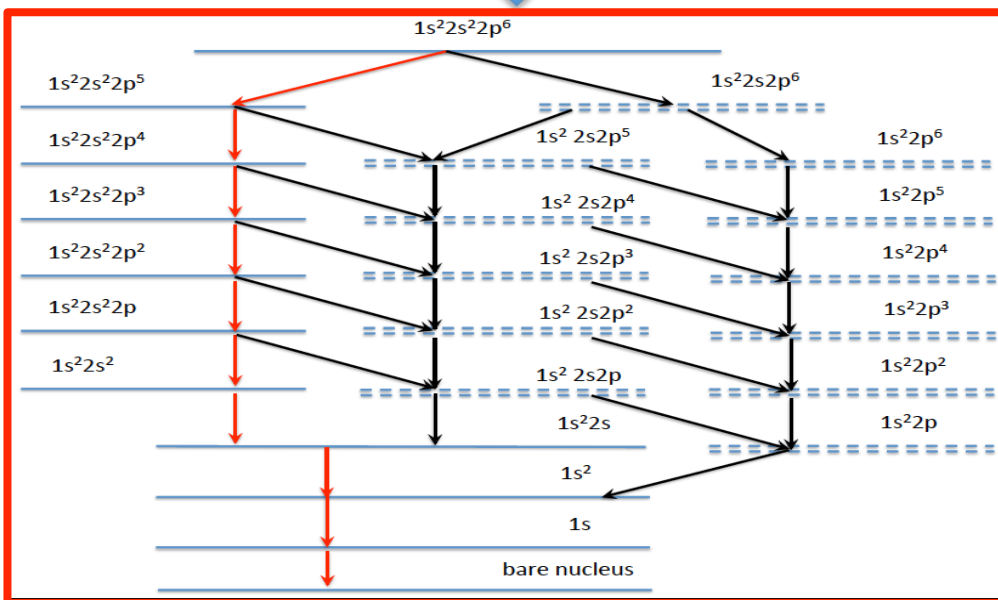
Усреднение по фокусу

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) f(t) \sin(\omega t + \beta(\mathbf{r}))$$

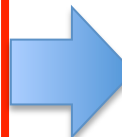
$$0 \leq t \leq T$$



$$N(A^{k+}) = n_0 \int C_k(\mathbf{r}) d^3r$$

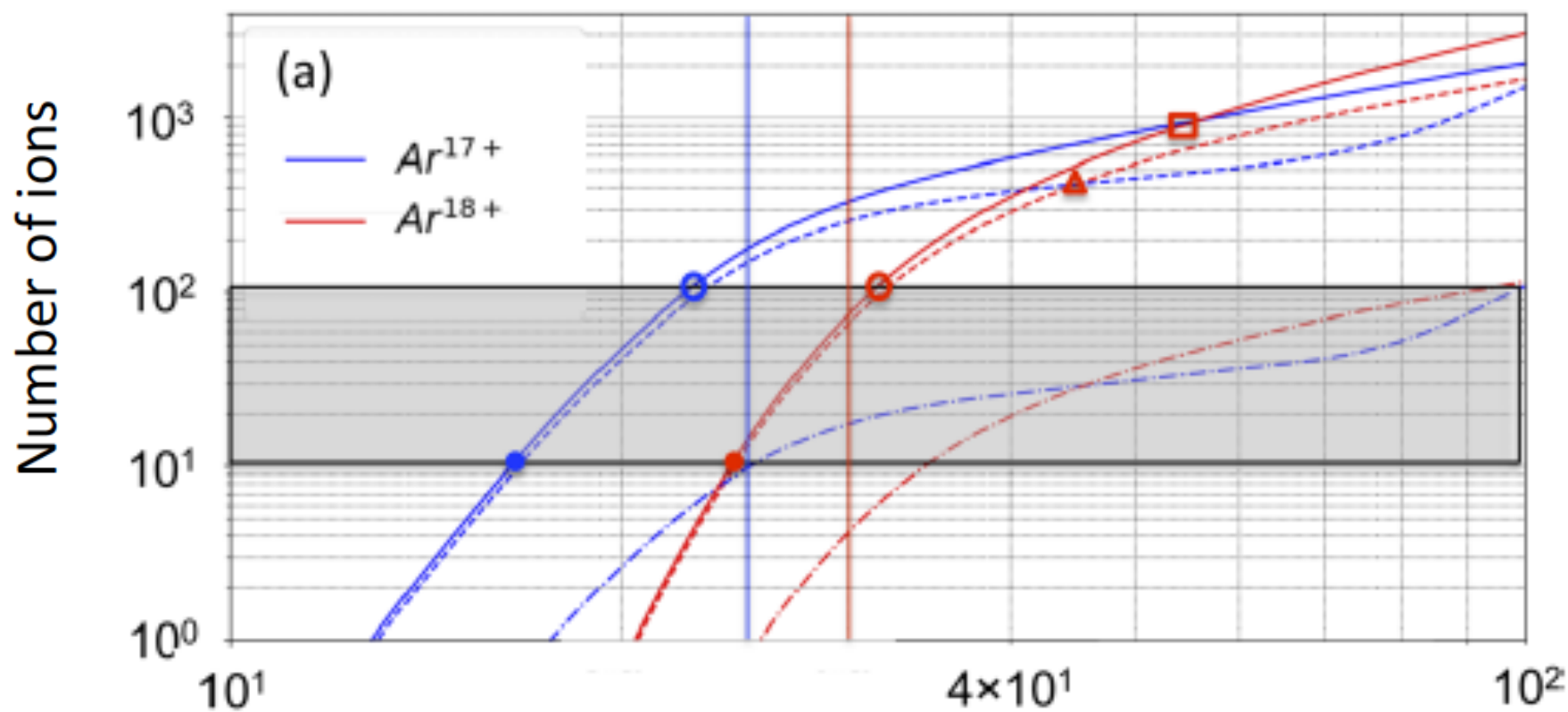


C_k – населенности состояний A^{k+} на момент окончания импульса



Суммарный сигнал из фокуса

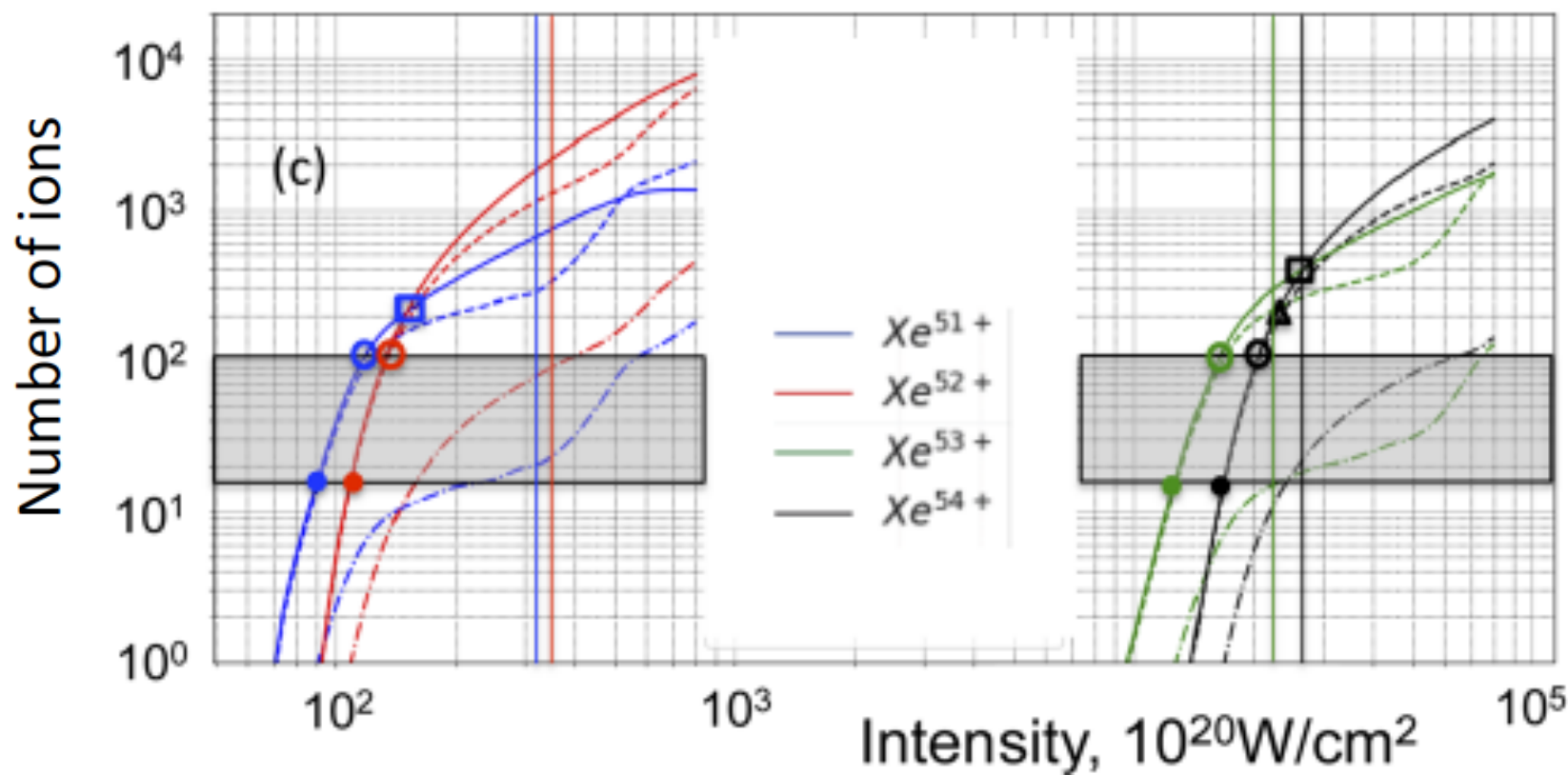
Ионизация аргона: давление в пучке 10^{-4} Тор, диаметр фокуса в перетяжке 3мкм, угол схождения пучка 0.18рад. Измерение интенсивности около $5 \cdot 10^{21}$ W/cm²



$$I^* \approx 7.03 \cdot 10^{-6} (I_p)^3 [10^{20}] \text{W/cm}^2 \quad \text{Intensity, } 10^{20} \text{W/cm}^2$$

Суммарный сигнал из фокуса

Ионизация аргона: давление в пучке 10^{-4} Тор, диаметр фокуса в перетяжке 3мкм, угол схождения пучка 0.18рад. Измерение интенсивности около 10^{22} W/cm² и 10^{24} W/cm²



$$I^* \approx 7.03 \cdot 10^{-6} (I_p)^3 [10^{20}] \text{W/cm}^2$$

Экспериментальная реализация

PHYSICAL REVIEW A, VOLUME 63, 042712

“Nonrelativistic” ionization of the L -shell states in argon by a “relativistic” 10^{19} W/cm² laser field

Enam A. Chowdhury,¹ C. P. J. Barty,² and Barry C. Walker¹

¹*Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, Newark, Delaware 19716*

²*Department of Chemistry and Biochemistry, University of California San Diego, San Diego, California 92093*

REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 77, 10E723 (2006)

Development of an *in situ* peak intensity measurement method for ultraintense single shot laser-plasma experiments at the Sandia Z petawatt facility

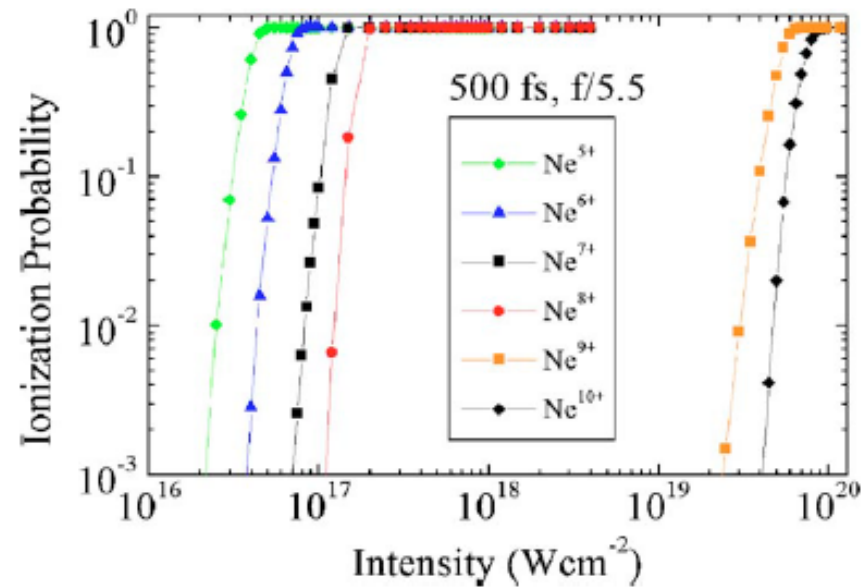
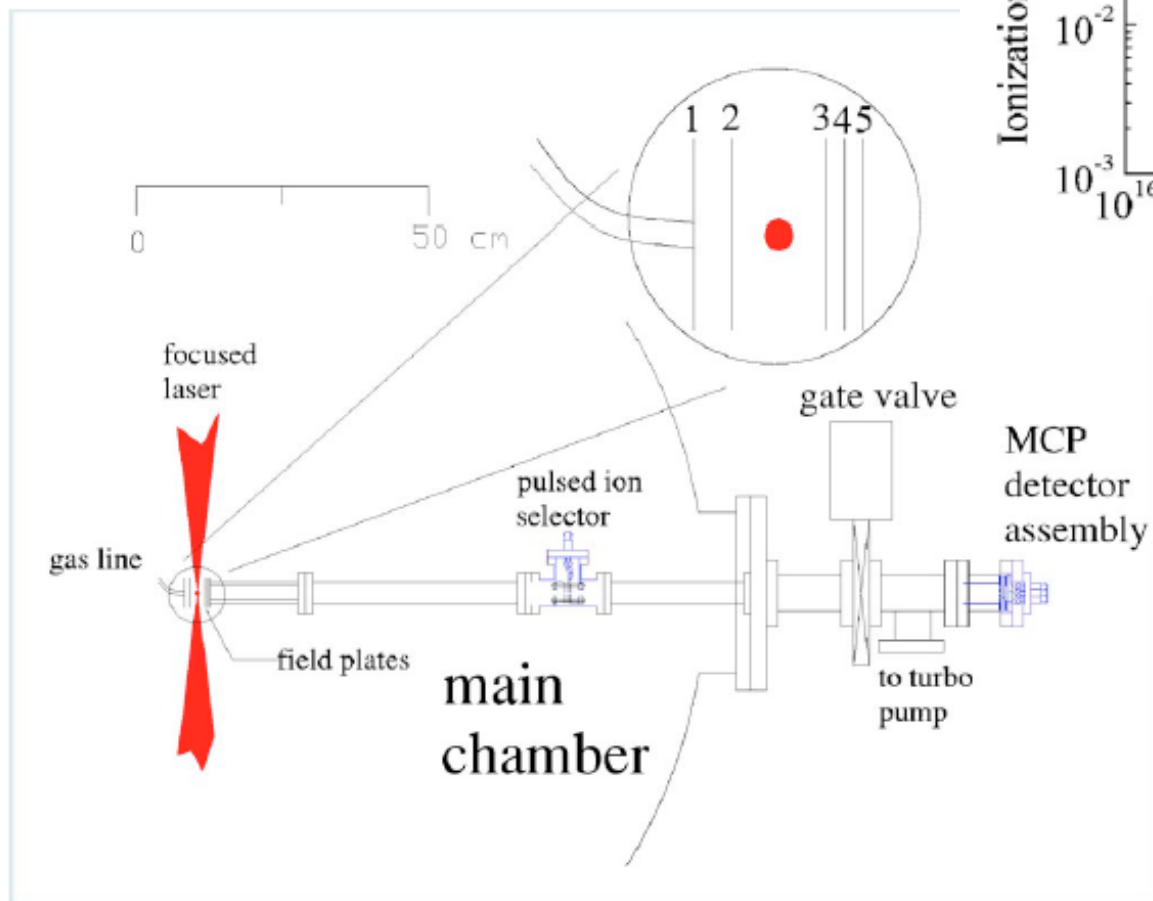
Anthony Link, Enam A. Chowdhury, John T. Morrison, Vladimir M. Ovchinnikov,
Dustin Offermann, Linn Van Woerkom, and Richard R. Freeman
The Ohio State University, 191 West Woodruff Avenue, Columbus, Ohio 43210

John Pasley, Erik Shipton, and Farhat Beg
University of California, San Diego, 9500 Gilman Drive, La Jolla, California 92093-0411

Patrick Rambo, Jens Schwarz, Matthias Geissel, Aaron Edens, and John L. Porter
Sandia National Laboratories, P.O. Box 5800, MS 1193, Albuquerque, New Mexico 87185-1193

Экспериментальная реализация

A. Link et al., Rev. Sci. Inst., 2006



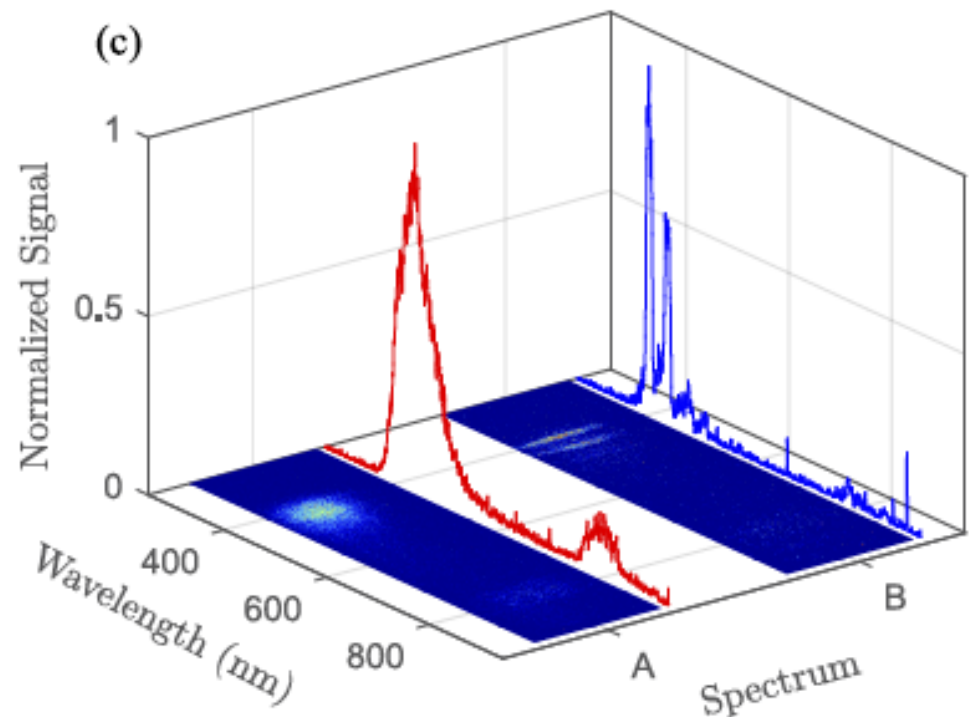
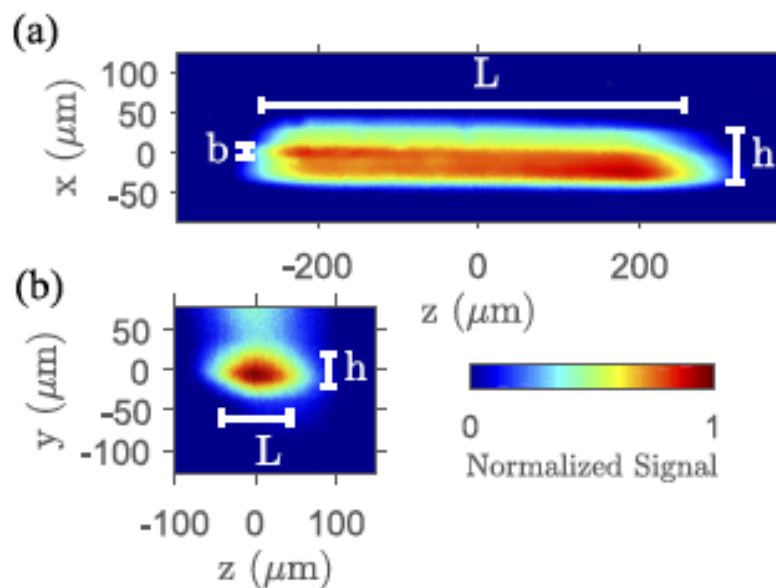
Параметры:

- ✓ аргон
- ✓ фоновое давление <40pTorr
- ✓ давление в пучке 10^{-5} Torr
- ✓ 10^{19} – 10^{20} Вт/см²

Другие предлагаемые подходы




Towards an *in situ*, full-power gauge of the focal-volume intensity of petawatt-class lasers

C. Z. HE,^{1,2} A. LONGMAN,³ J. A. PÉREZ-HERNÁNDEZ,⁴ M. DE MARCO,⁴ C. SALGADO,⁴ G. ZERAOULI,⁴ G. GATTI,⁴ L. ROSO,⁴ R. FEDOSEJEVS,³ AND W. T. HILL III^{1,2,5,*}



Другие предлагаемые подходы

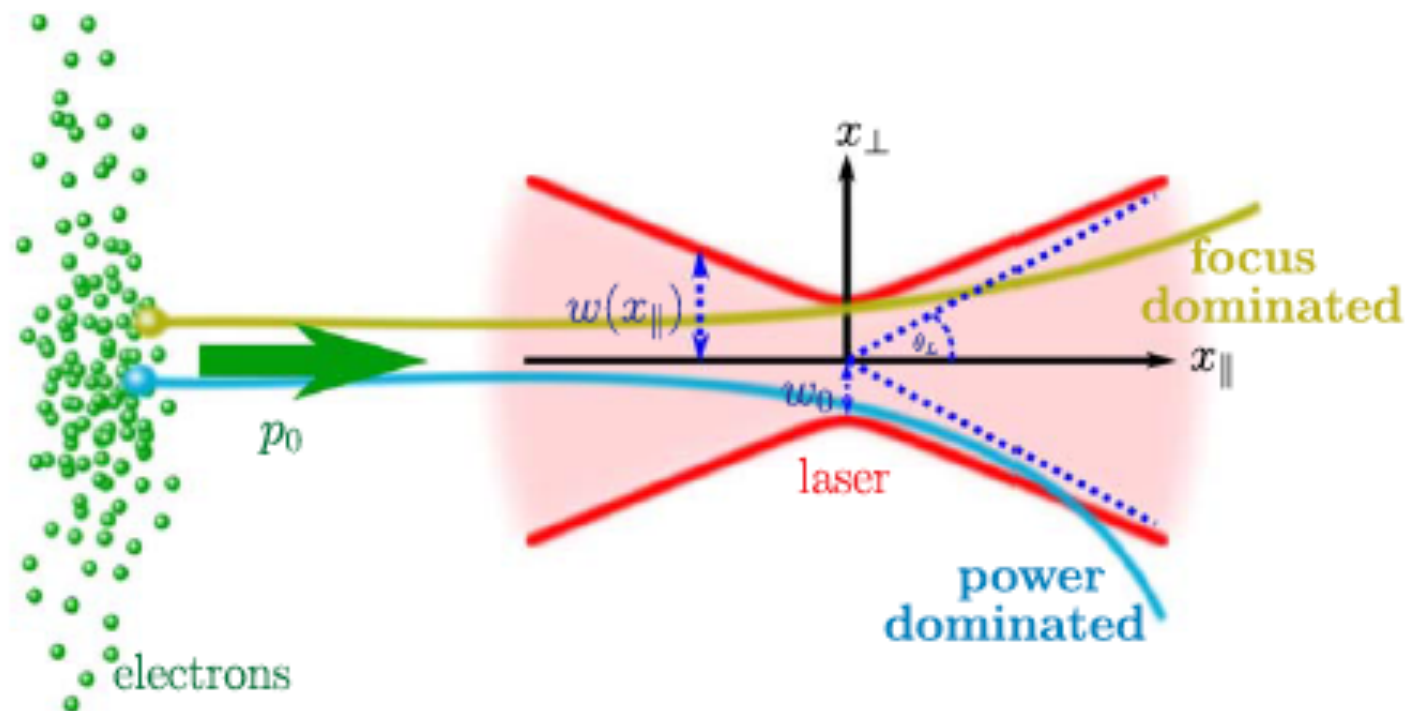
Ultra-intense laser pulse characterization using ponderomotive electron scattering

Felix Mackenroth¹ , Amol R Holkundkar^{1,2}  and Hans-Peter Schlenvoigt³ 

¹ Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Nöthnitzer Strasse 38, D-01187 Dresden, Germany






² Department of Physics, Birla Institute of Technology and Science—Pilani, Rajasthan, 333031, India

³ Helmholtz-Zentrum Dresden—Rossendorf, Institute of Radiation Physics, Bautzner Landstr. 400, D-01328 Dresden, Germany



Другие предлагаемые подходы

Characterizing extreme laser intensities by ponderomotive acceleration of protons from rarified gas

O E Vais¹ , A G R Thomas² , A M Maksimchuk² , K Krushelnick²  and V Yu Bychenkov^{1,3} 

¹ P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

² Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109-2099, United States of America

³ Center For Fundamental and Applied Research, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow 127055, Russia

Pair production seeded by electrons in noble gases as a method for the laser intensity diagnostics

I. A. Aleksandrov^{1,2,*} and A. A. Andreev^{1,3,4}

¹*Department of Physics, St. Petersburg State University, Universitetskaya Naberezhnaya 7/9, Saint Petersburg 199034, Russia*

²*Ioffe Institute, Politekhnicheskaya str. 26, Saint Petersburg 194021, Russia*

³*ELI-ALPS, ELI-HU NKft. Dugonics tér 13, Szeged 6720, Hungary*

⁴*Max-Born Institut, Max-Born Str. 2A, Berlin 12489, Germany*

Итоговые замечания

❖ Достоинства схемы:

- Простая и количественно точная теория
- Нет принципиальных проблем в экспериментальной реализации (???)
- Точность порядка 30–50% и может быть увеличена
- Нет ограничения сверху на величину интенсивности
- Возможно в том же эксперименте померять излучение электронов, возникающих в процессе туннельной ионизации – дополнительный способ оценки интенсивности

Итоговые замечания

❖ Достоинства схемы:

- Простая и количественно точная теория
- Нет принципиальных проблем в экспериментальной реализации (???)
- Точность порядка 30–50% и может быть увеличена
- Нет ограничения сверху на величину интенсивности
- Возможно в том же эксперименте померять излучение электронов, возникающих в процессе туннельной ионизации – дополнительный способ оценки интенсивности

❖ Сложности:

- Наиболее точное определение интенсивности требует измерения ионизации $1s^2$ состояний → для покрытия широкого интервала нужно использовать различные газы.
- Ограничения сверху на давление газа в пучке → жесткие требования к мишенной камере и детектору ионов

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

С. Попруженко

Институт общей физики им. А.М. Прохорова



M. Ciappina, S Weber

S. Bulanov, G. Korn

ELI-Beamlines, Czech Republic



Е. Пеганов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ



T. Ditmire

University of Texas at Austin, USA



Ionization cascades

Kr³⁰⁺

$$\frac{dc_{30}}{dt} = -c_{30} \left\{ \frac{2}{3} [w(\nu_{30}, 1, 0; t) + 2w(\nu_{30}, 1, \pm 1; t)] + 2w(\nu'_{30}, 0, 0; t) \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{dc_{31}}{dt} = & -c_{31} \left\{ \frac{1}{3} [w(\nu_{31}, 1, 0; t) + 2w(\nu_{31}, 1, \pm 1; t)] - 2w(\nu'_{31}, 0, 0; t) \right\} + \\ & + c_{30} \frac{2}{3} [w(\nu_{30}, 1, 0; t) + 2w(\nu_{30}, 1, \pm 1; t)] , \end{aligned}$$

$$\frac{dc'_{31}}{dt} = -c'_{31} \left\{ \frac{2}{3} [w(\nu'_{31}, 1, 0; t) + 2w(\nu'_{31}, 1, \pm 1; t)] + w(\nu''_{31}, 0, 0; t) \right\} + 2c_{30}w(\nu'_{30}, 0, 0; t)$$

$$\frac{dc_{32}}{dt} = -2c_{32}w(\nu_{32}, 0, 0; t) + c_{31} \left\{ \frac{1}{3} [w(\nu_{31}, 1, 0; t) + 2w(\nu_{31}, 1, \pm 1; t)] \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{dc'_{32}}{dt} = & -\frac{1}{3}c'_{32} [w(\nu'_{32}, 1, 0; t) + 2w(\nu'_{32}, 1, \pm 1; t)] - c'_{32}w(\nu''_{32}, 0, 0; t) + \\ & + 2c_{31}w(\nu'_{31}, 0, 0; t) + c'_{31} \left\{ \frac{2}{3} [w(\nu'_{31}, 1, 0; t) + 2w(\nu'_{31}, 1, \pm 1; t)] \right\} , \end{aligned}$$

$$\frac{dc''_{32}}{dt} = -\frac{2}{3}c''_{32} [w(\nu''_{32}, 1, 0; t) + 2w(\nu''_{32}, 1, \pm 1; t)] + c'_{31}w(\nu''_{31}, 0, 0; t)$$

...

Ionization of krypton at 10^{19} – 10^{23} W/cm²

