

Элементарные процессы в атомах и ионах в поле рентгеновских лазеров на свободных электронах

А.Н. Грум-Гржимайло, Е.В. Грызлова



Skobeltsyn
Institute of Nuclear Physics

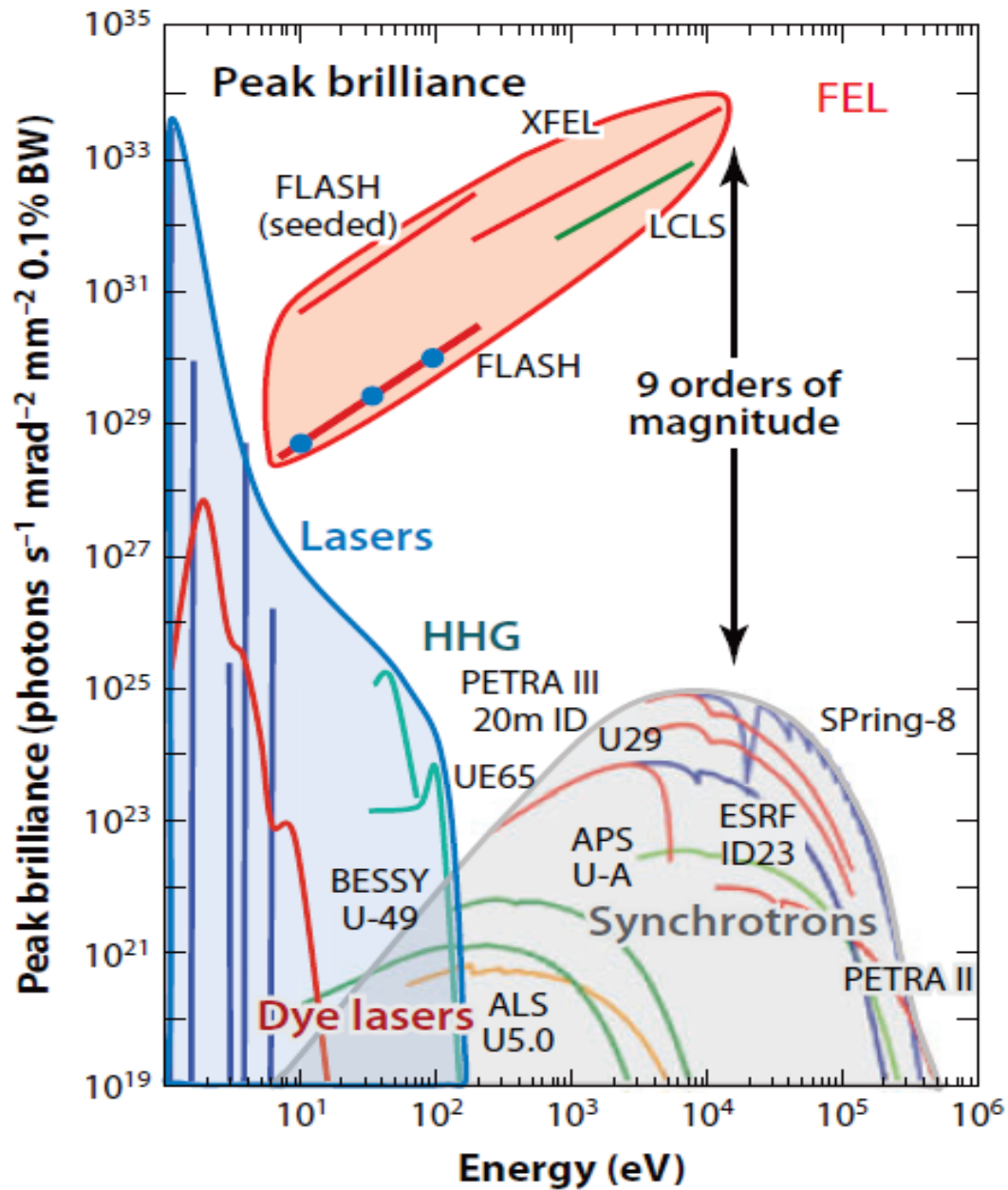
Lomonosov Moscow State University

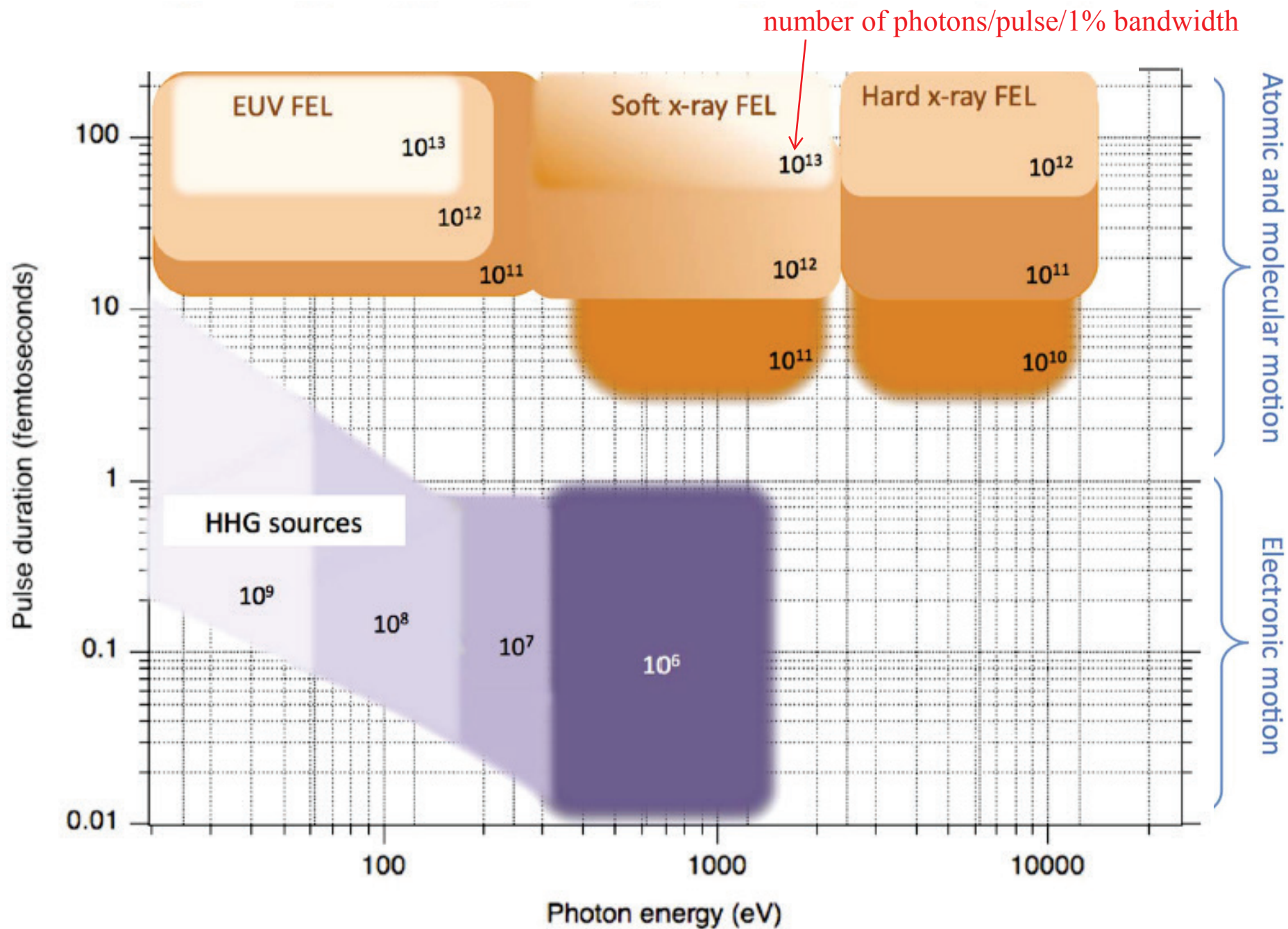
Рентгеновские лазеры на свободных электронах

Уникальный НАБОР свойств:

- Длины волн в рентгеновском диапазоне и крайнем ультрафиолете (20-15000 eV)
 - Фемтосекундная длительность импульсов
 - Яркость
- (+ продольная когерентность, перестраиваемость частоты и поляризации излучения)*

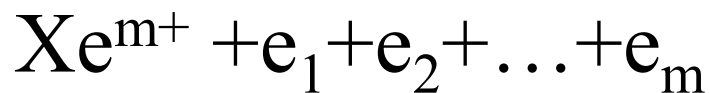
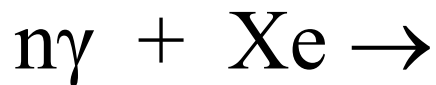
Взятые по отдельности, эти свойства не уникальны. Уникальна их комбинация.





Одно из новых направлений: нелинейные процессы в ВУФ и рентгеновском диапазоне

Пример:



B.Rudek et al.

Nat. Communications 9, 4200 (2018)

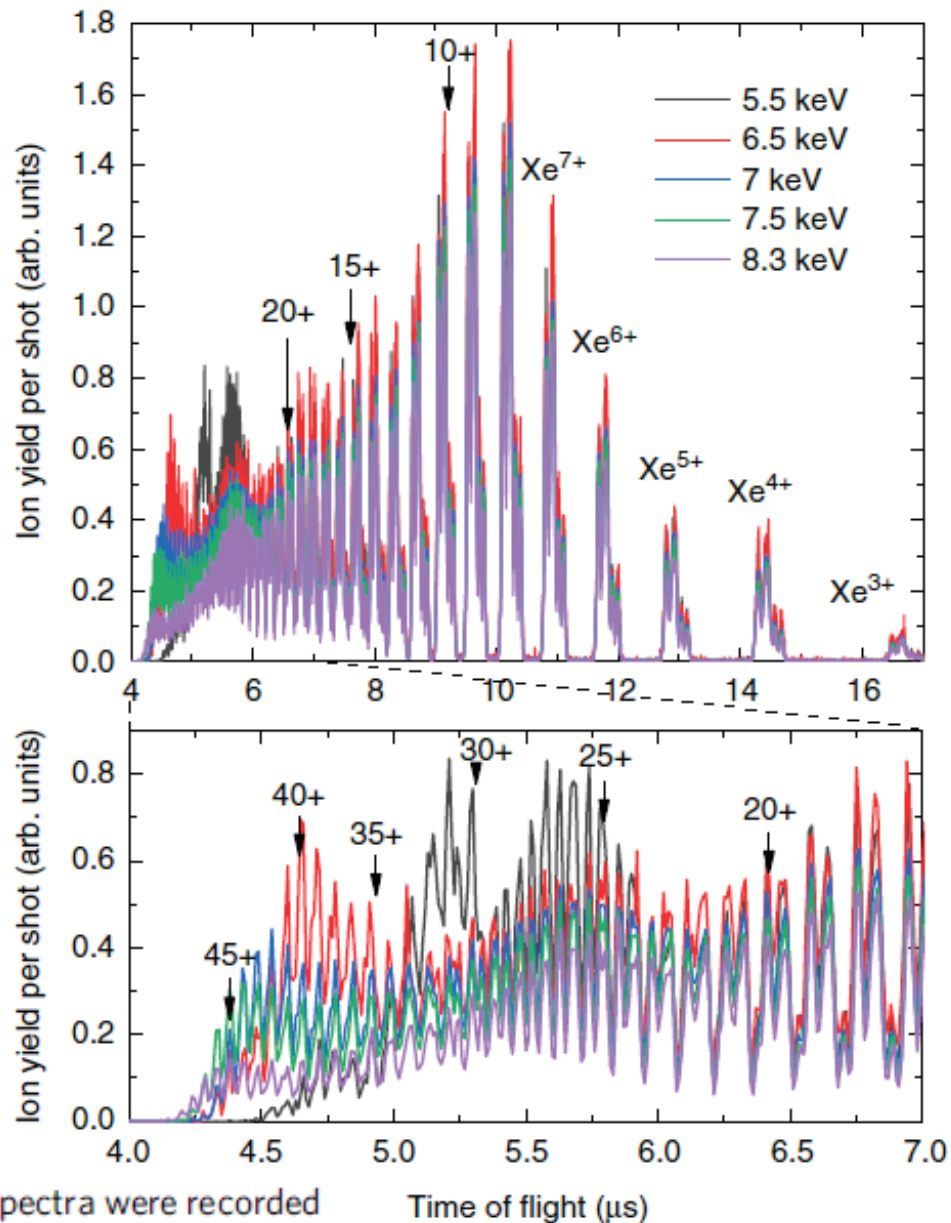
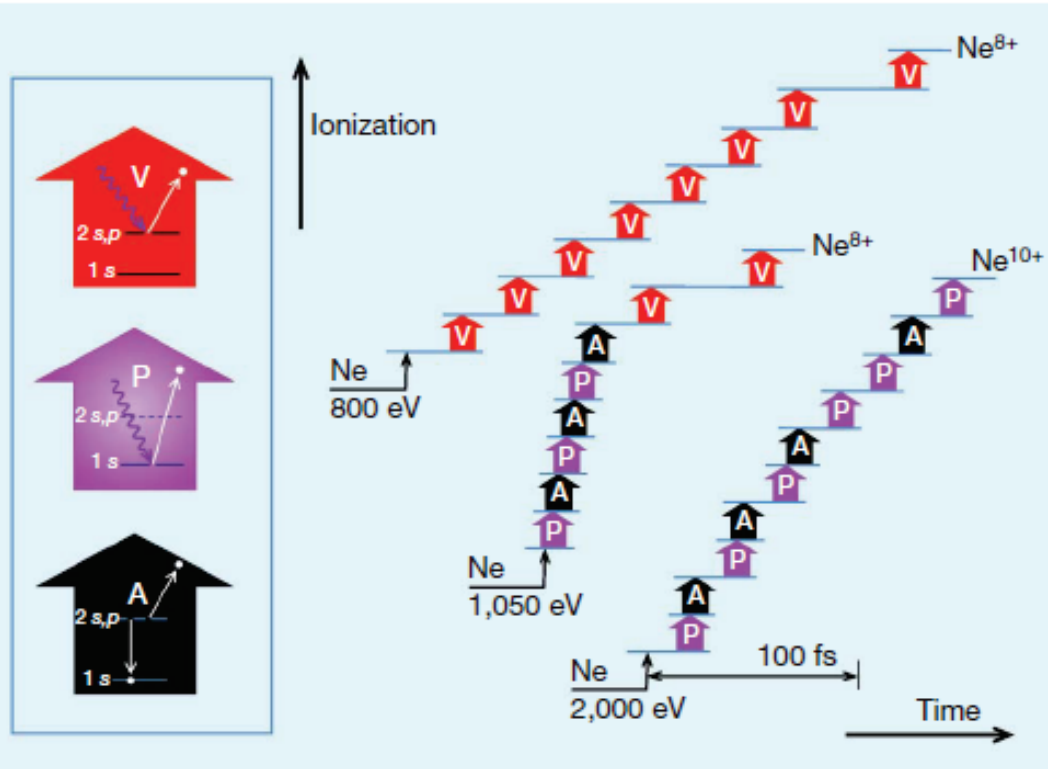
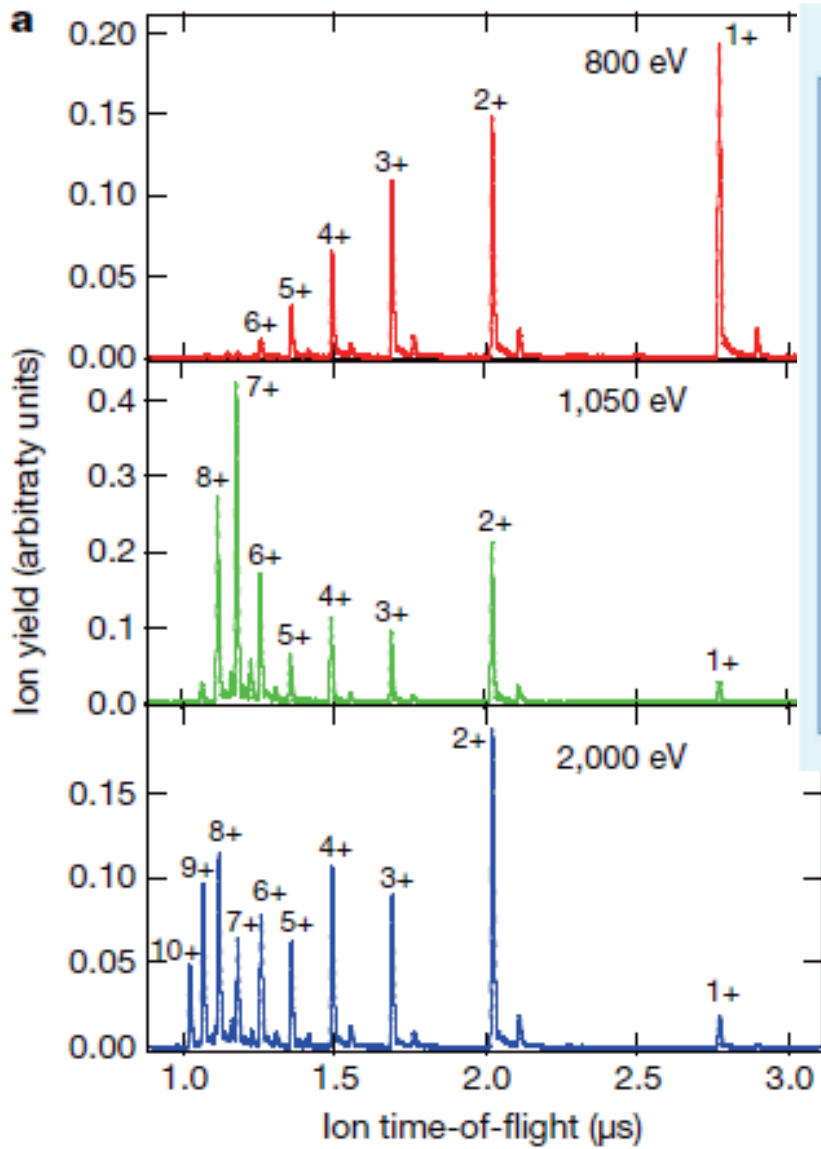
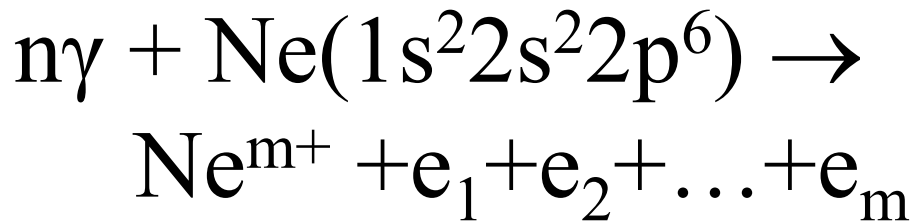


Fig. 1 Ion time-of-flight spectra of atomic xenon. The spectra were recorded at photon energies from 5.5 to 8.3 keV at the same nominal pulse energy of 3.7 ± 0.05 mJ. The lower graph magnifies the region of high charge states. The arrows indicate the n -th xenon charge state, $^{132}\text{Xe}^{n+}$

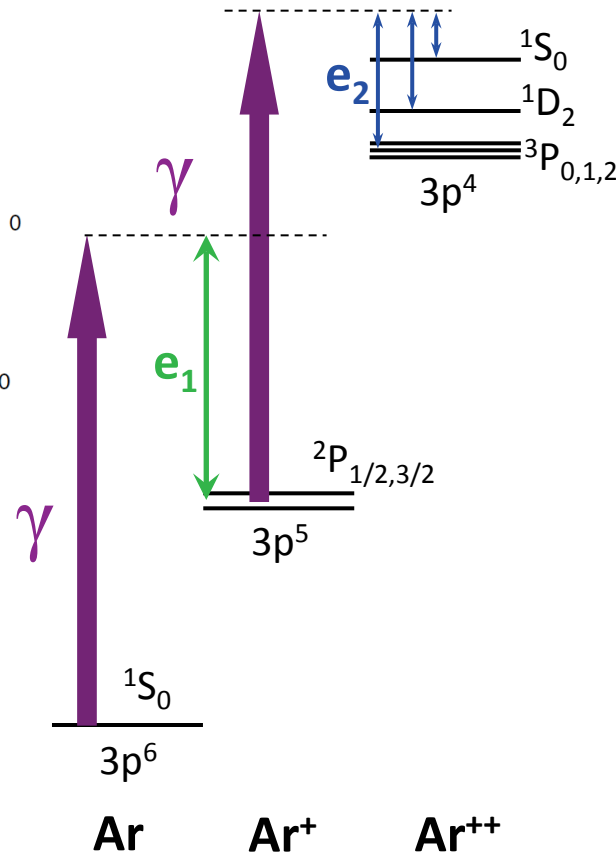
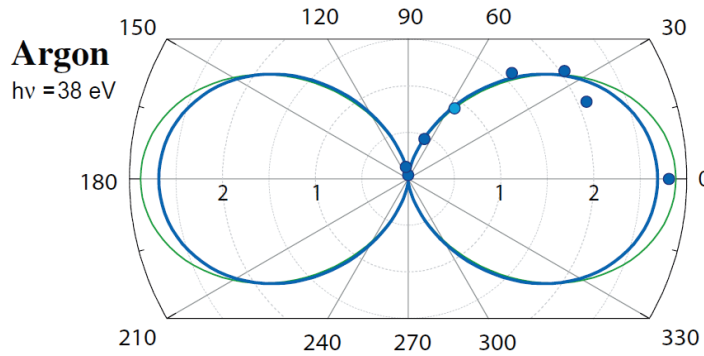


10^5 X-ray photons / \AA^2 in pulse



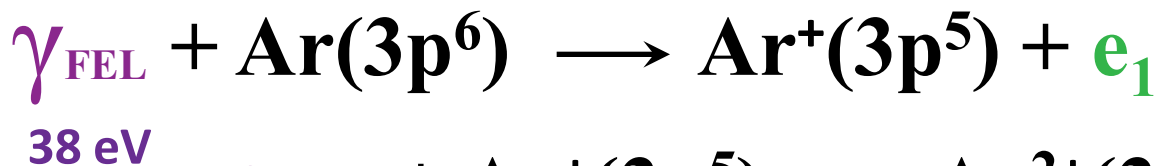
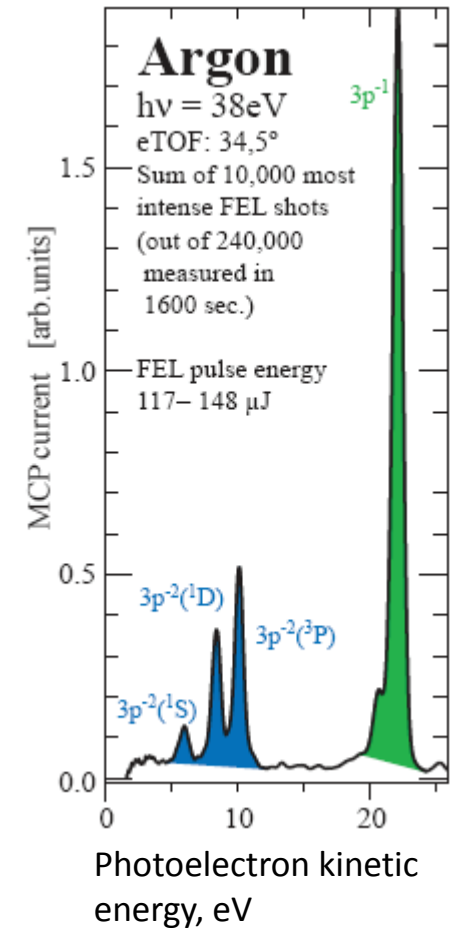
LCLS

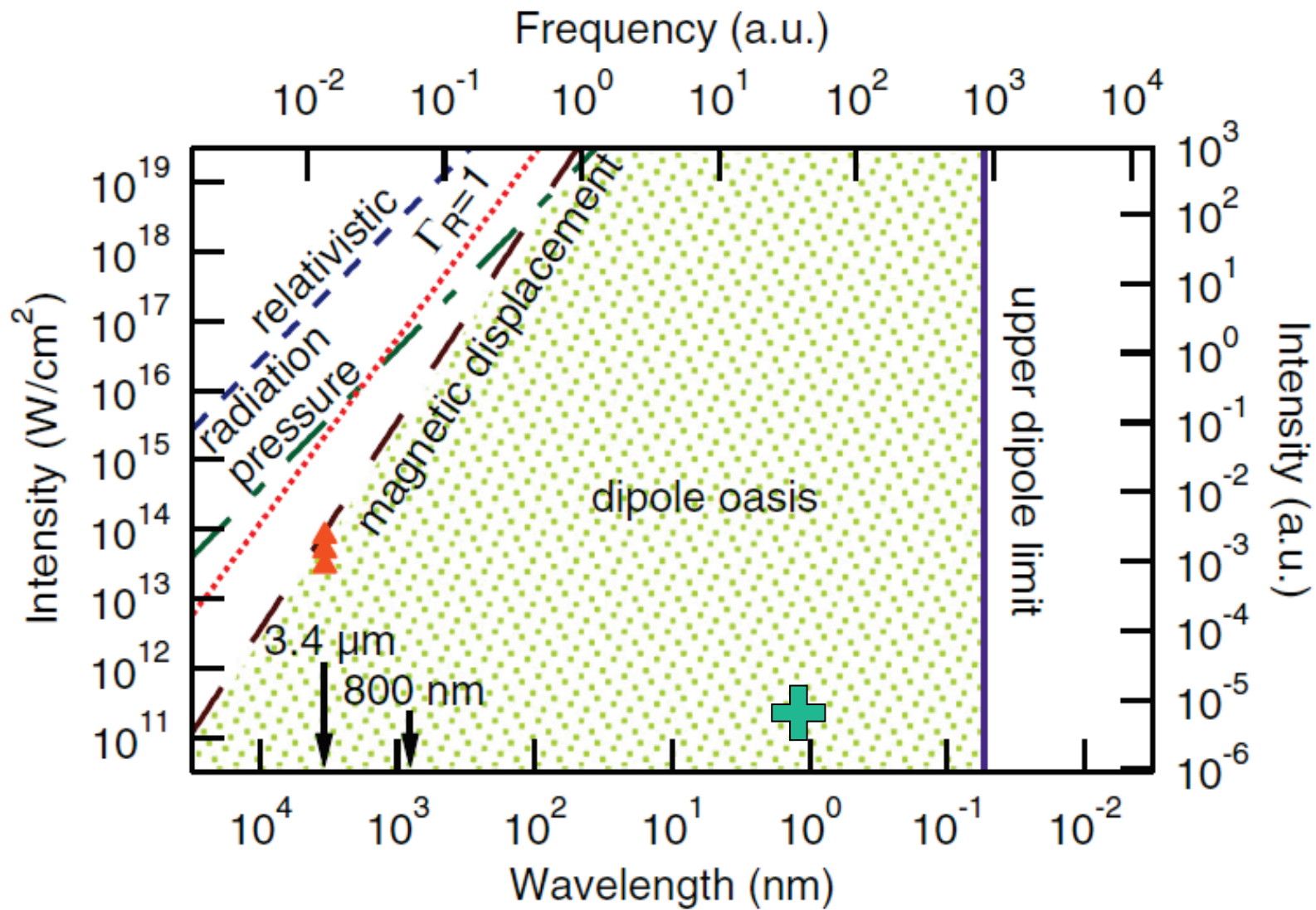
Спектр и угловые распределения электронов, Ar



M. Braune et al, 2009

FLASH experiment





$$e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} = 1 + i\mathbf{k}\mathbf{r} + \dots$$

- **Введение**
- **Фотоэлектронная спектроскопия положительно заряженных ионов**
 - (I) 'Полный' эксперимент по фотоионизации
P.A. Carpeggiani et al. Nature Physics 15, 170 (2019)
 - (II) Недипольные эффекты
M. Ilchen et al. Nature Communications 9, 4659 (2018)
- **(III) Когерентное управление в ВУФ**
K. Prince et al. Nature Photonics 10, 176 (2016)

- **Введение**

- **Фотоэлектронная спектроскопия положительно заряженных ионов**

- (I) 'Полный' эксперимент по фотоионизации

- P.A. Carpeggiani et al. Nature Physics 15, 170 (2019)

- (II) Недипольные эффекты

- M. Ilchen et al. Nature Communications 9, 4659 (2018)

- (III) Когерентное управление в ВУФ

- K. Prince et al. Nature Photonics 10, 176 (2016)

Теория

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ

Е.И. Старосельская, М.М. Попова

Физический факультет МГУ

С.М. Бурков

Тихоокеанский ГУ, Хабаровск

K. Bartschat, N. Douguet

Drake University, Des Moines, Iowa, USA

Экспериментальные группы

G. Sansone

Freiburg Univ., Germany

K. Prince

ELETTRA, Trieste, Italy

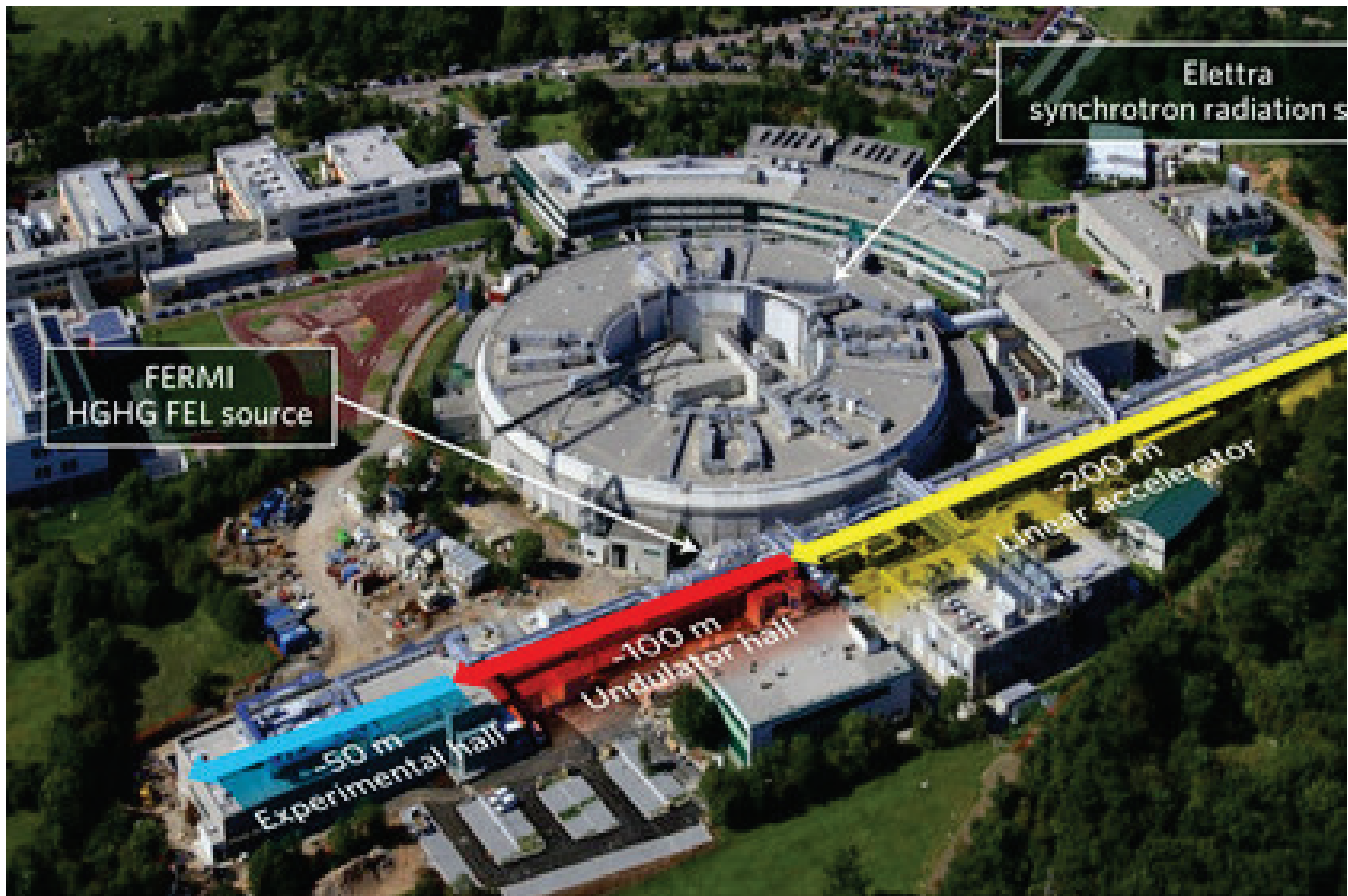
K. Ueda

Tohoku Univ., Sendai, Japan

M. Meyer

European XFEL, Hamburg, Germany

FEL FERMI (Trieste)



I

‘Полный’ эксперимент (‘Perfect’ or ‘complete’ experiment)

THE “COMPLETE EXPERIMENT” IN β DECAY

Ya. A. SMORODINSKIĬ

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) **36**, 1606–1608 (May, 1959)

... how many experiments are required for the reconstruction of the scattering matrix for scattering of nucleons by nucleons (the “complete experiment”).

Bederson, B.: The ‘Perfect’ scattering experiment.

I. Comm. Atom. Mol. Phys. **1**, 41–45 (1969)

How many independent differential scattering experiments are required in order to fully determine all the parameters which are calculable from potential scattering theory?

Reid, K.L.: Photoelectron angular distributions.

Annu. Rev. Phys. Chem. **54**, 397–424 (2003)

In experiments aimed at determining information about photoionization dynamics, the ‘Holy Grail’ is the complete experiment.

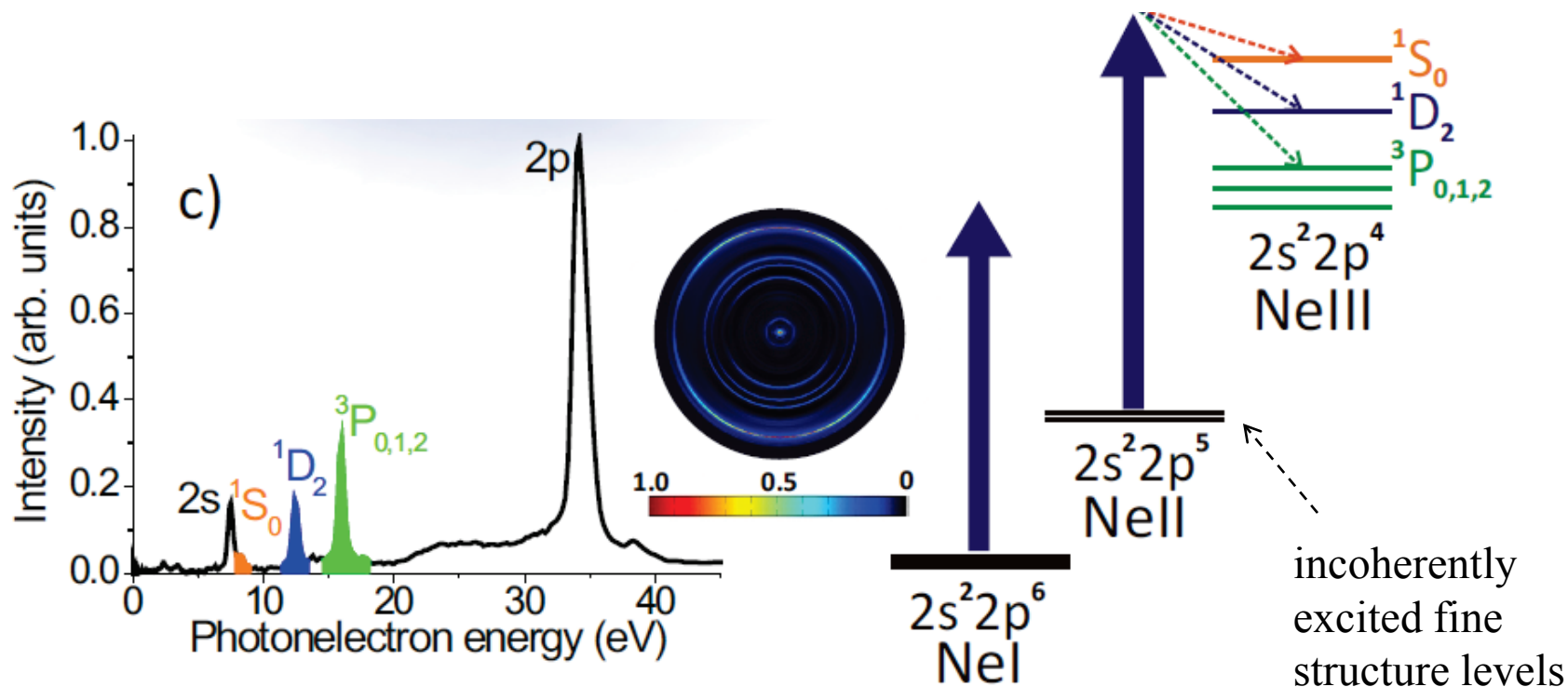
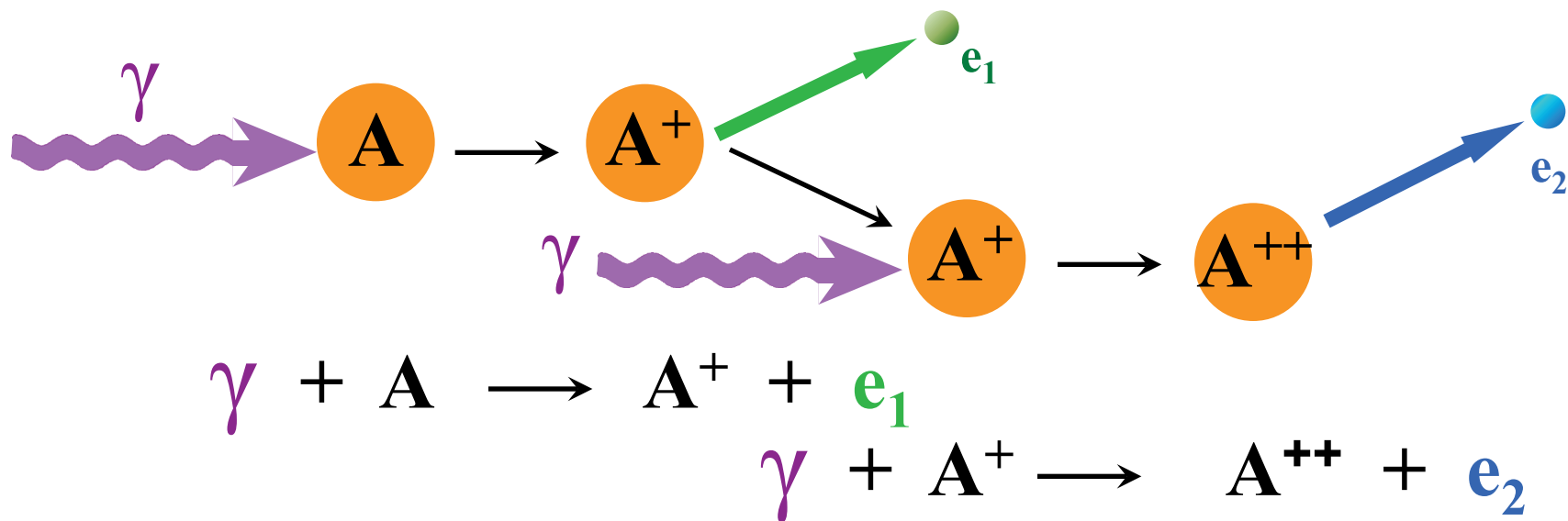
Мотивация:

- Дает наиболее полную проверку теории вплоть до уровня, разрешенного квантовой механикой, и выявляет конкретные дефектные места теории.
- Предсказание любой наблюдаемой, относящейся к изучаемому процессу.

Важно:

Эксперимент может быть «полным» только в рамках определенных модельных представлений (которые дают число независимых амплитуд, которые необходимо измерить).

Рецепты «полного» эксперимента модельно зависимы.



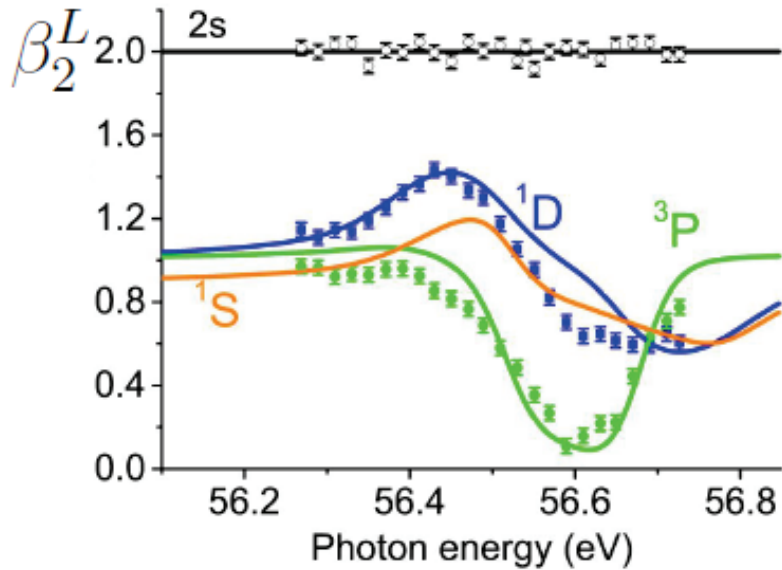
В 'простых' приближениях:

$$\gamma + \text{Ne}^+(2s^2 2p^5 \ ^2P) \rightarrow \text{Ne}^{2+}(2s^2 2p^4 \ ^3P) + \begin{cases} e^-(E_s) & D_s = d_s^{(2)} \exp \varphi_s^{(2)} \\ e^-(E_d) & D_d = d_d^{(2)} \exp \varphi_d^{(2)} \end{cases}$$

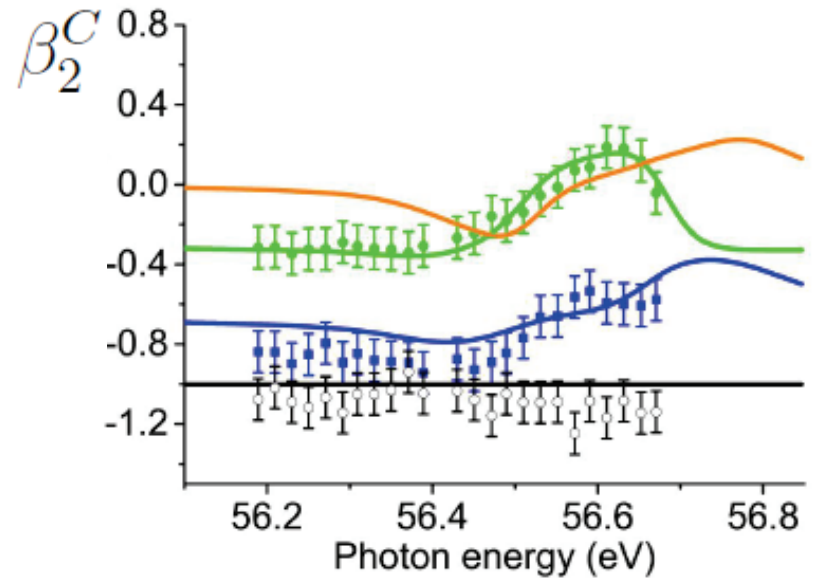
Угловое распределение фотоэлектронов:

$$I^\nu(\theta) = \frac{I_0^\nu}{4\pi} [1 + \beta_2^\nu P_2(\cos \theta) + \beta_4^\nu P_4(\cos \theta)]$$

Линейная поляризация ЛСЭ



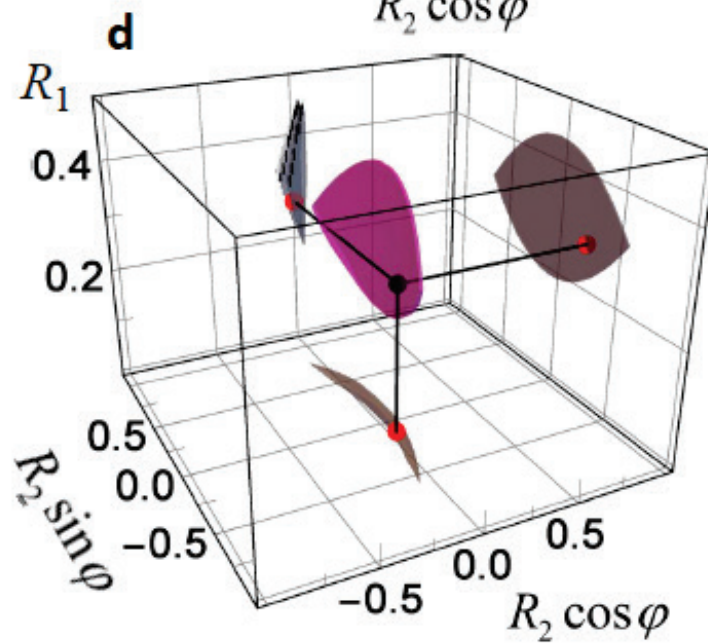
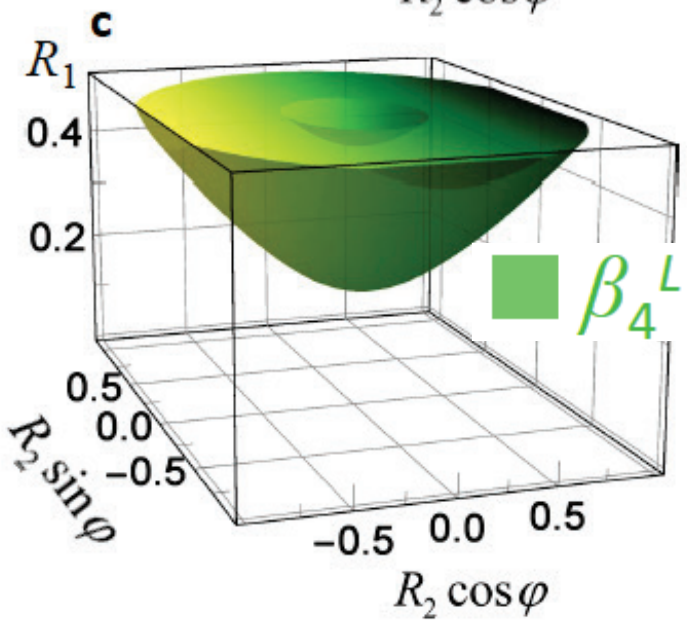
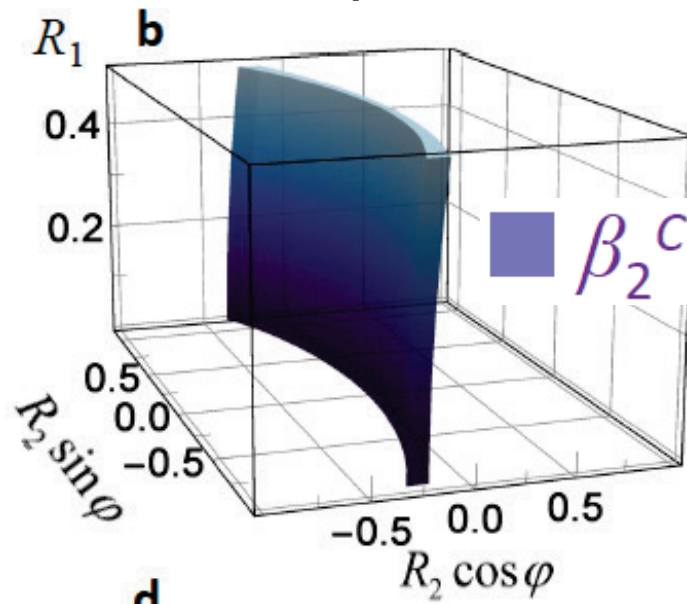
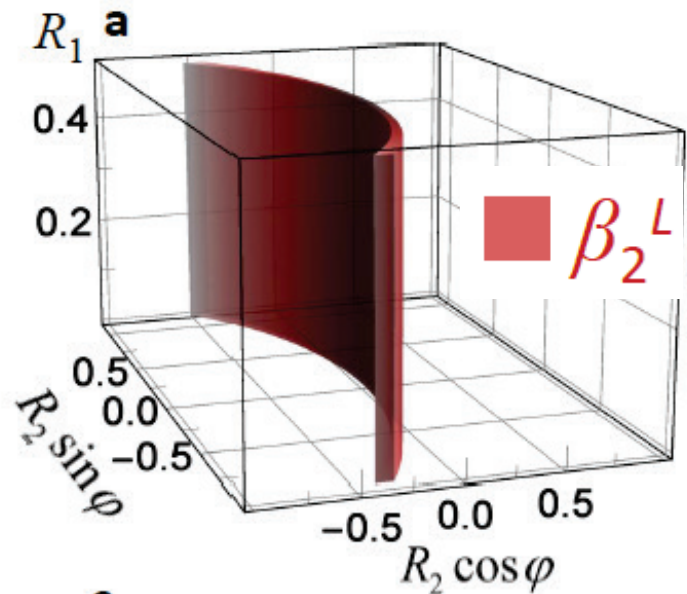
Круговая поляризация ЛСЭ



Параметры: $R_1 = \left| d_s^{(1)} / d_d^{(1)} \right|$ $R_2 = \left| d_s^{(2)} / d_d^{(2)} \right|$ $\varphi = \varphi_s^{(2)} - \varphi_d^{(2)}$

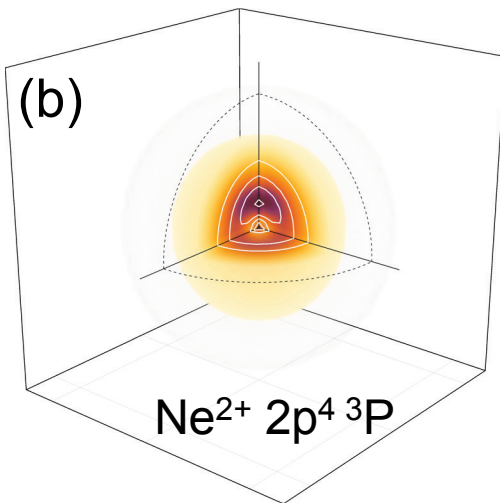
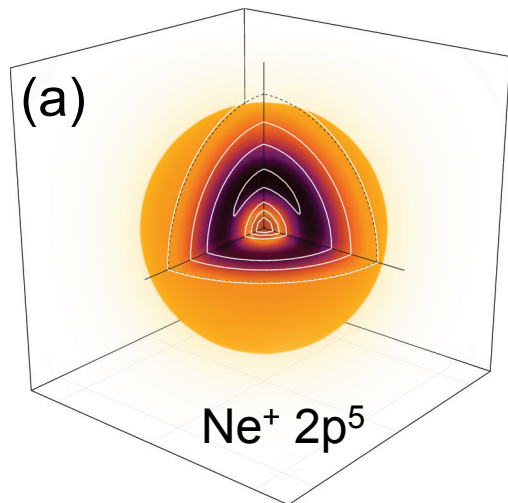
“Пространство параметров”

Первый ‘полный’ эксперимент по фотоионизации положительного иона



$E_\gamma = 56.3 \text{ eV}$
1st step

$E_\gamma = 56.3 \text{ eV}$
2nd step



max



0

Остаточный ион

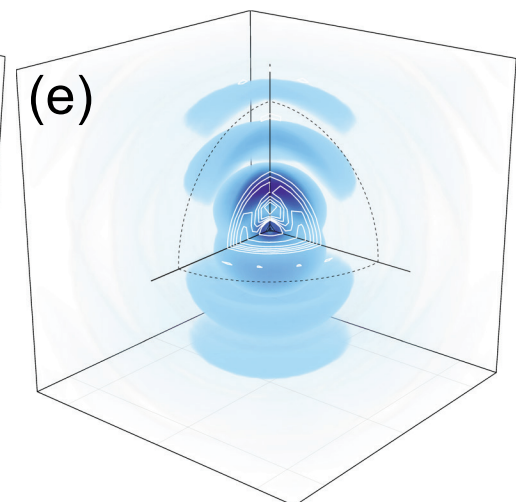
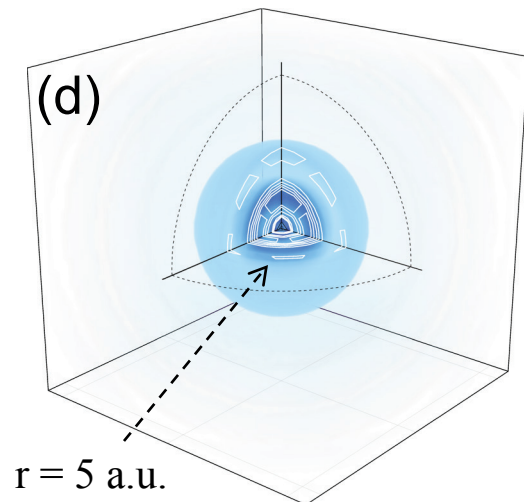
max



0

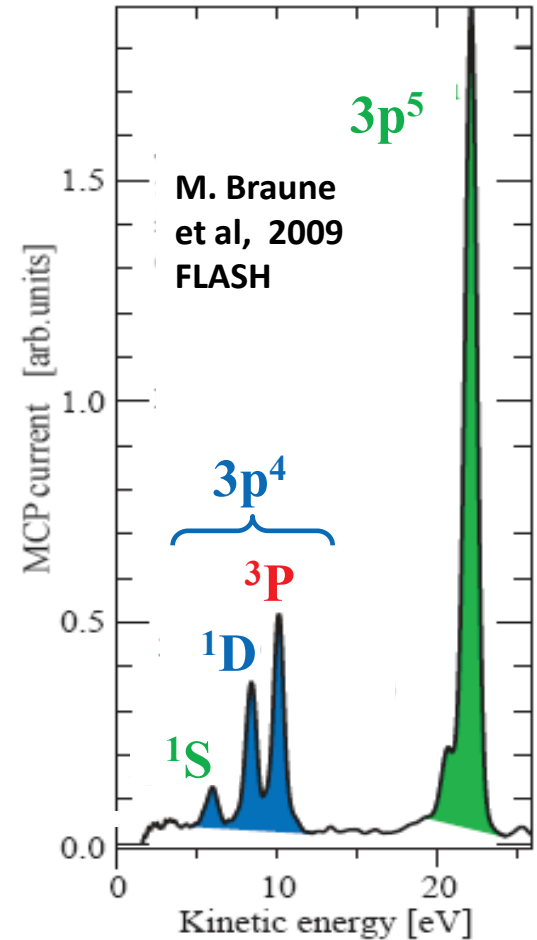
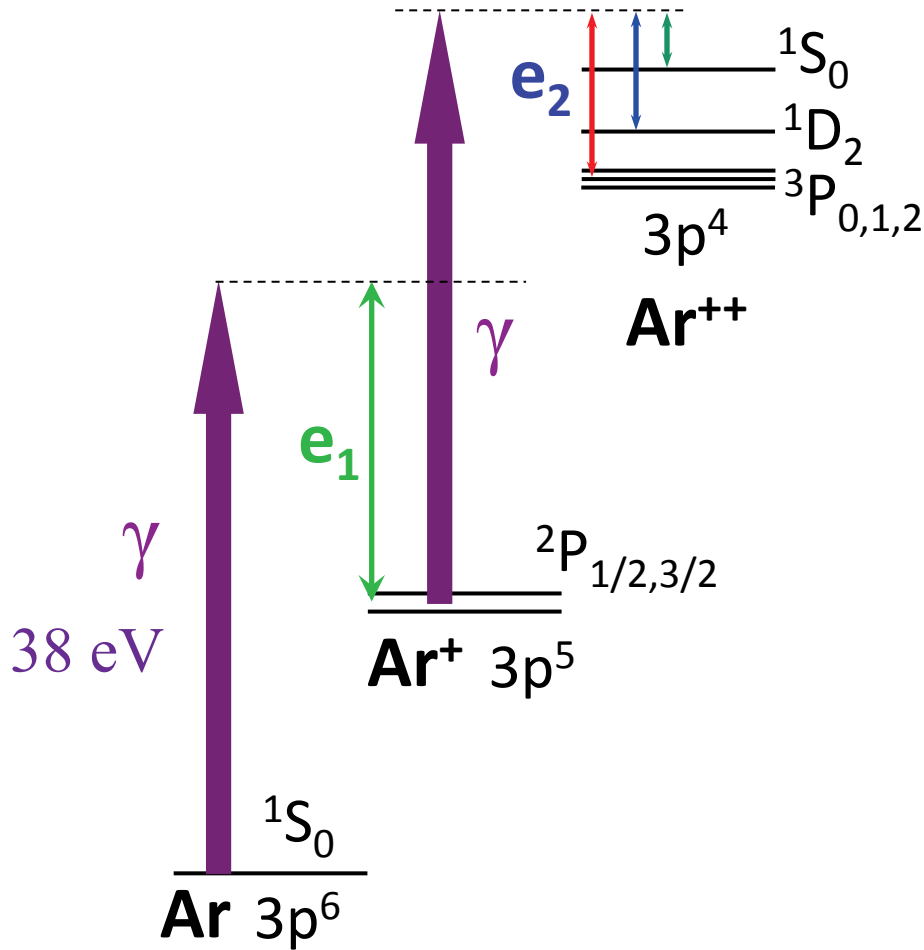
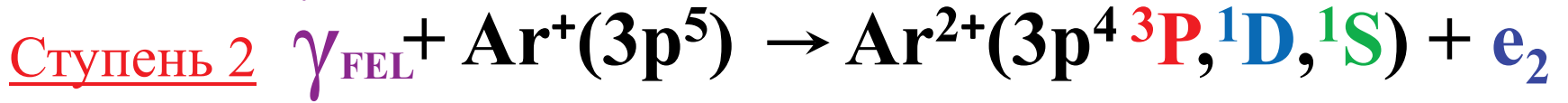
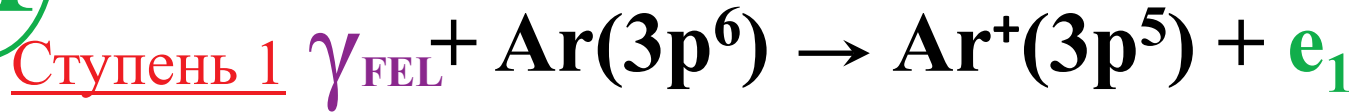
Фотоэлектрон

$z \parallel E$

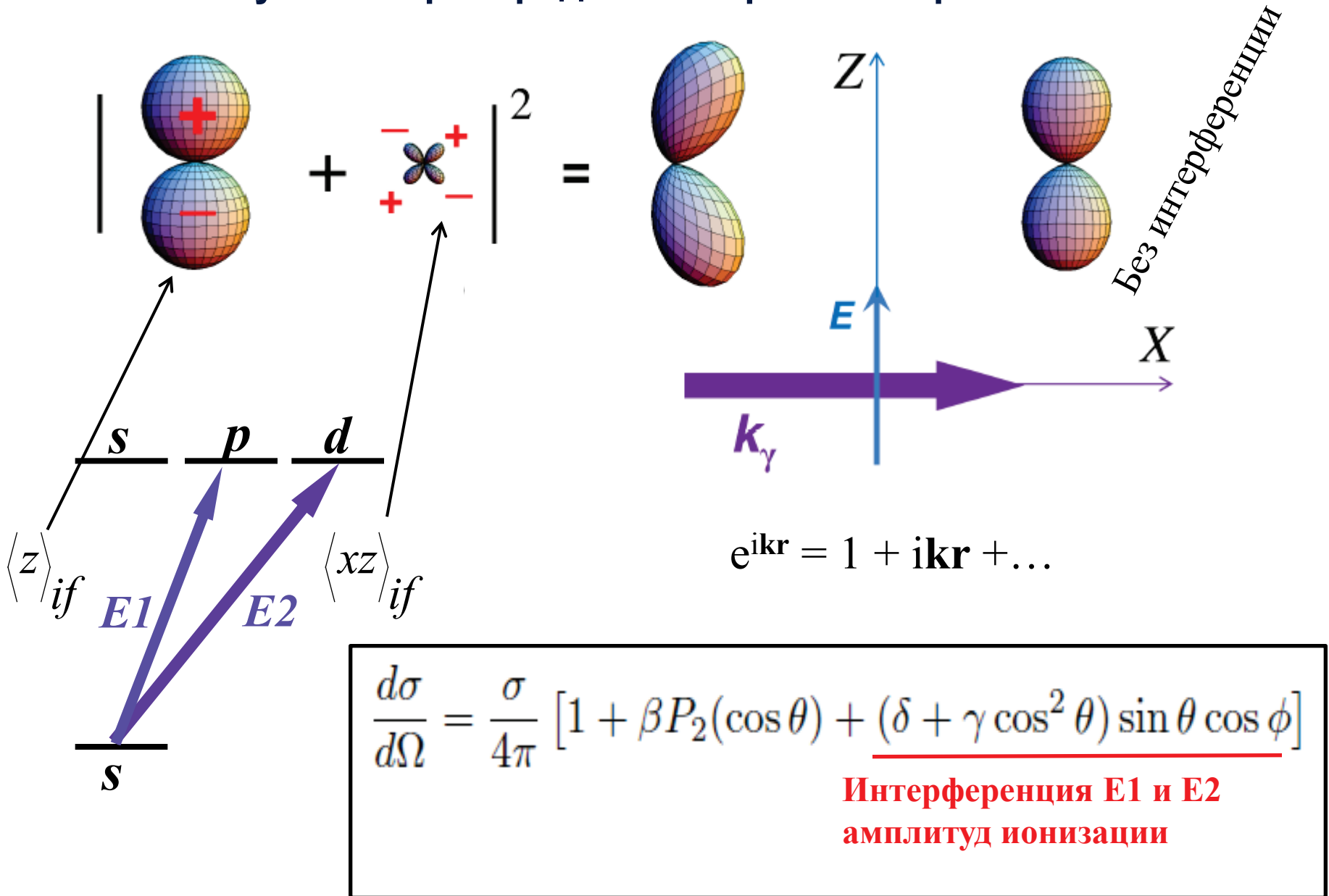


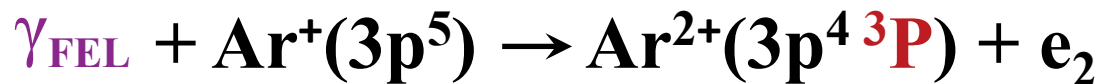
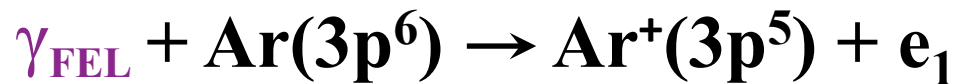
II

Недипольные эффекты

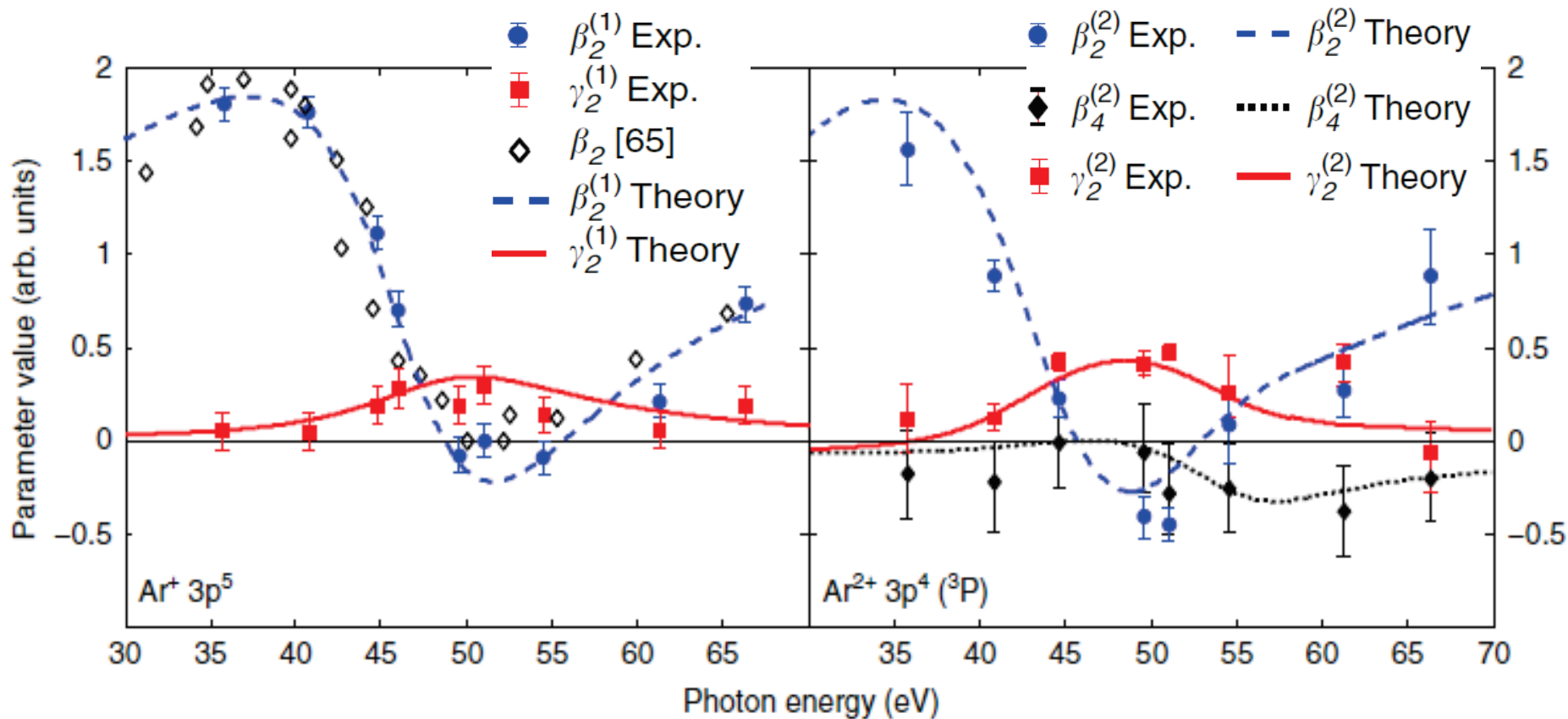


Нарушение симметрии вперед-назад в угловом распределении фотоэлектронов

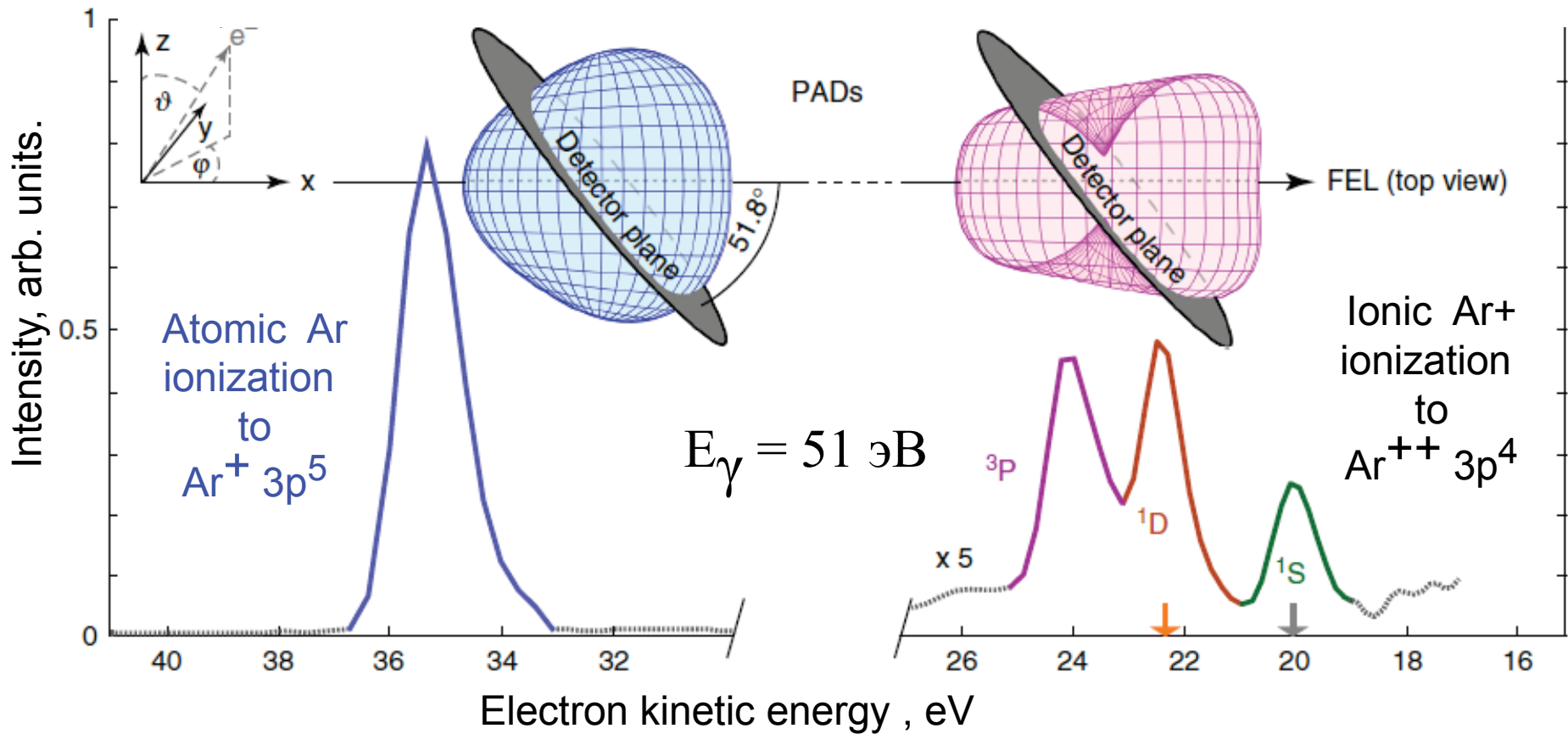




$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega_i} = \frac{\sigma_i}{4\pi} \left[1 + \beta_2^{(i)} P_2(\cos \vartheta_i) + \beta_4^{(i)} P_4(\cos \vartheta_i) \right. \\ \left. + \left(\delta^{(i)} + \gamma_2^{(i)} \cos^2 \vartheta_i + \gamma_4^{(i)} \cos^4 \vartheta_i \right) \sin \vartheta_i \cos \varphi_i \right]$$

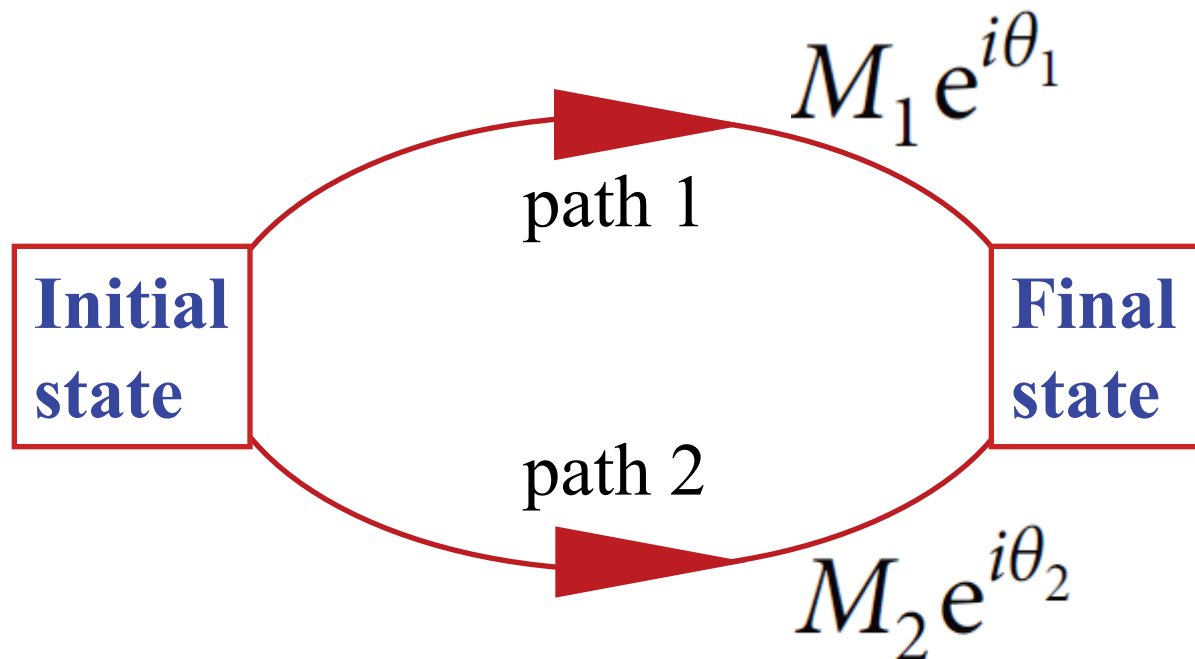


$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega_i} = \frac{\sigma_i}{4\pi} \left[1 + \beta_2^{(i)} P_2(\cos \vartheta_i) + \beta_4^{(i)} P_4(\cos \vartheta_i) + \left(\delta^{(i)} + \gamma_2^{(i)} \cos^2 \vartheta_i + \gamma_4^{(i)} \cos^4 \vartheta_i \right) \sin \vartheta_i \cos \varphi_i \right]$$



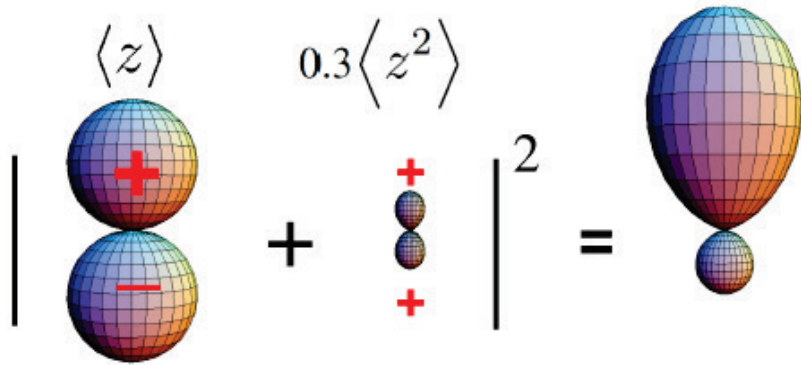
III

Когерентное управление в ВУФ



$$I \sim |M_1 e^{i\theta_1} + M_2 e^{i\theta_2}|^2$$
$$= |M_1|^2 + |M_2|^2 + 2|M_1||M_2| \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\mathcal{E}(t) = F(t)[\cos(\omega t + \phi_1) + \eta \cos(2\omega t + \phi_2)]$$

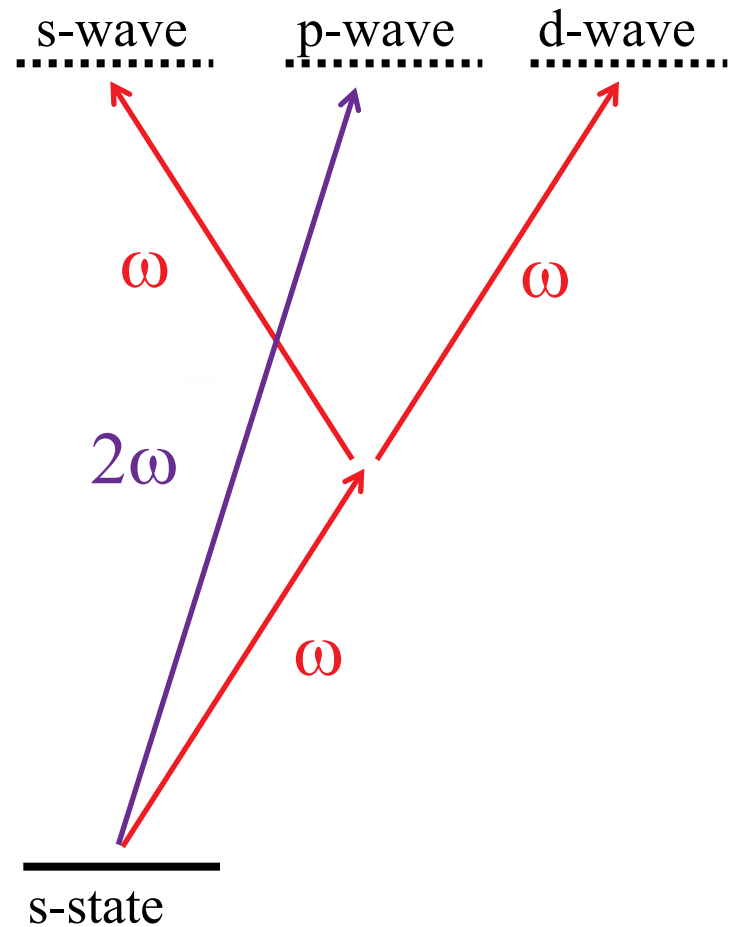


$$\left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_{lin} = \frac{W_0^{lin}}{4\pi} \left[1 + \sum_{k=1}^4 \beta_k^{lin} P_k(\cos \theta) \right]$$

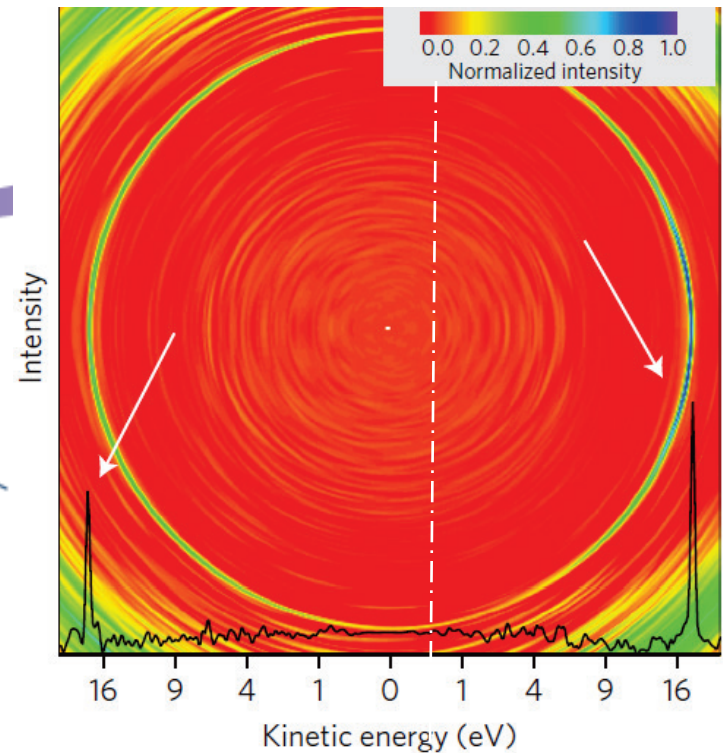
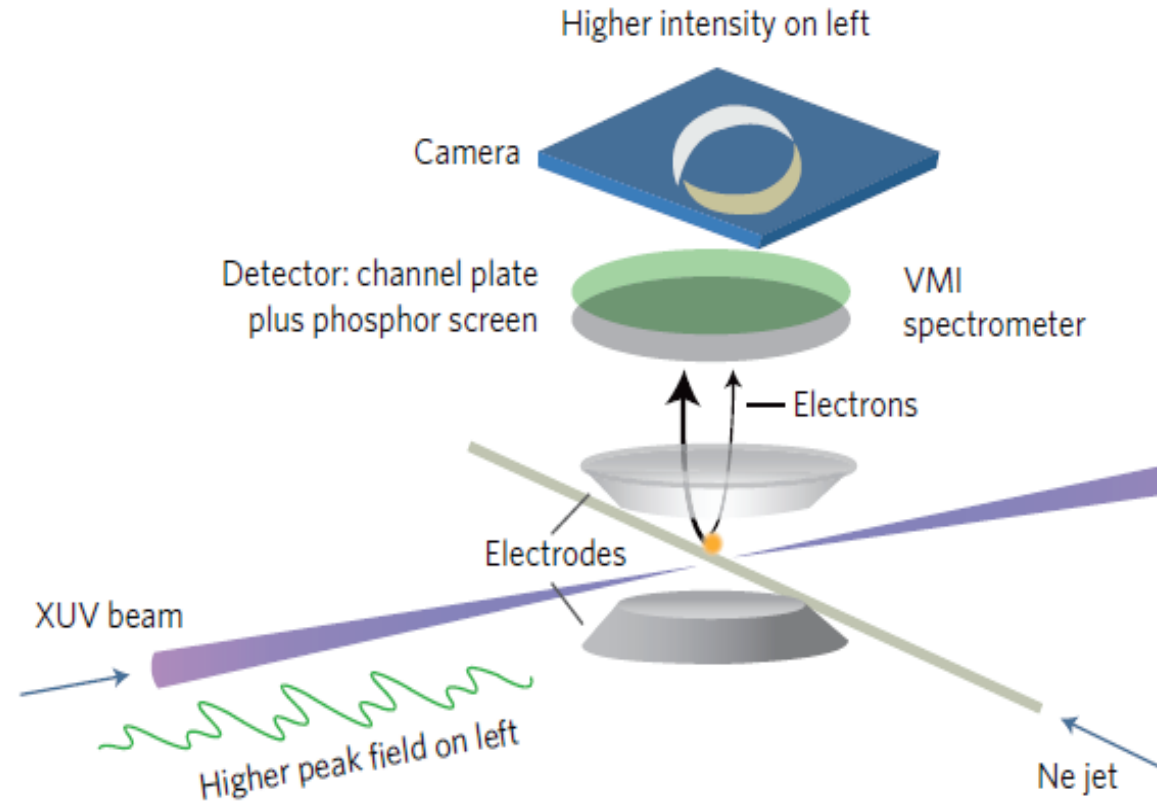
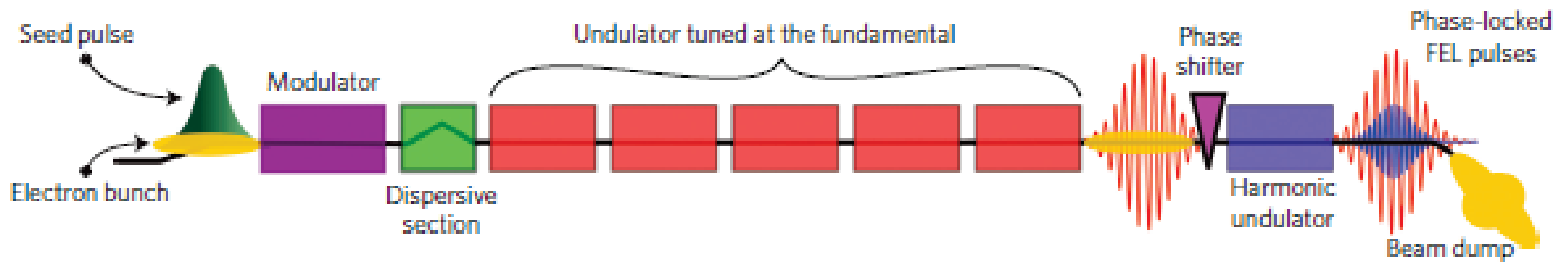
«право-левая» асимметрия:

$$A(\theta) = \frac{I(\theta) - I(180^\circ - \theta)}{I(\theta) + I(180^\circ - \theta)}$$

$$A(0^\circ) = \frac{I(0^\circ) - I(180^\circ)}{I(0^\circ) + I(180^\circ)} = \frac{\beta_1 + \beta_3}{1 + \beta_2 + \beta_4}$$



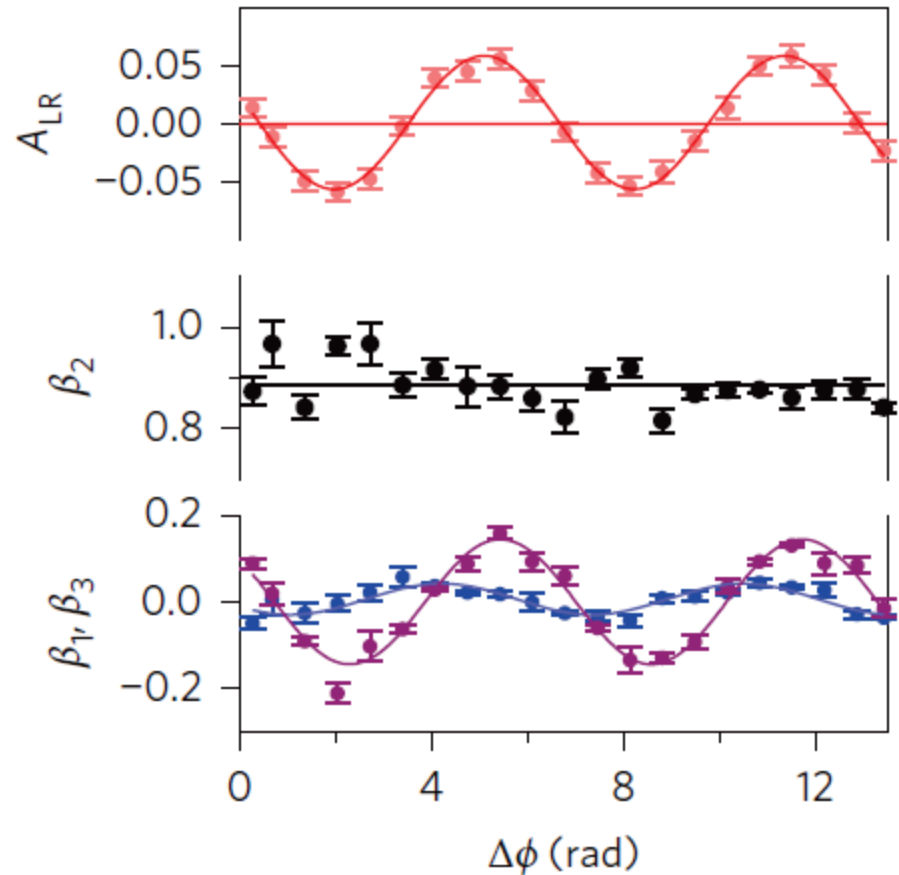
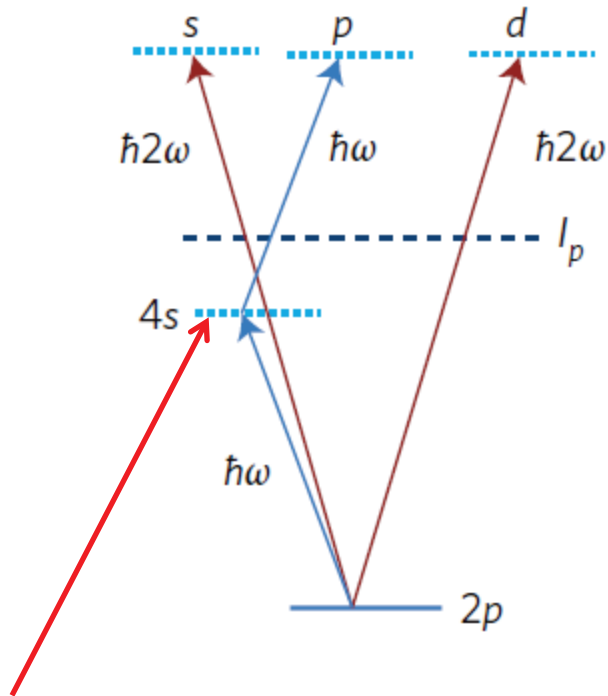
Это несложно в оптическом диапазоне, но большая проблема в ВУФ



Coherent control with a short-wavelength free-electron laser.

K. Prince et al, Nature Photon. **10**, 176 (2016)

Когерентное управление угловым распределением электронов



Используем резонанс для усиления двухфотонной ветки!

$$A(0^\circ) = \frac{I(0^\circ) - I(180^\circ)}{I(0^\circ) + I(180^\circ)} = \frac{\beta_1 + \beta_3}{1 + \beta_2 + \beta_4}$$

С помощью рентгеновских лазеров на свободных электронах можно впервые изучить еще много явлений в элементарных процессах с атомами и ионами

Спасибо за внимание!



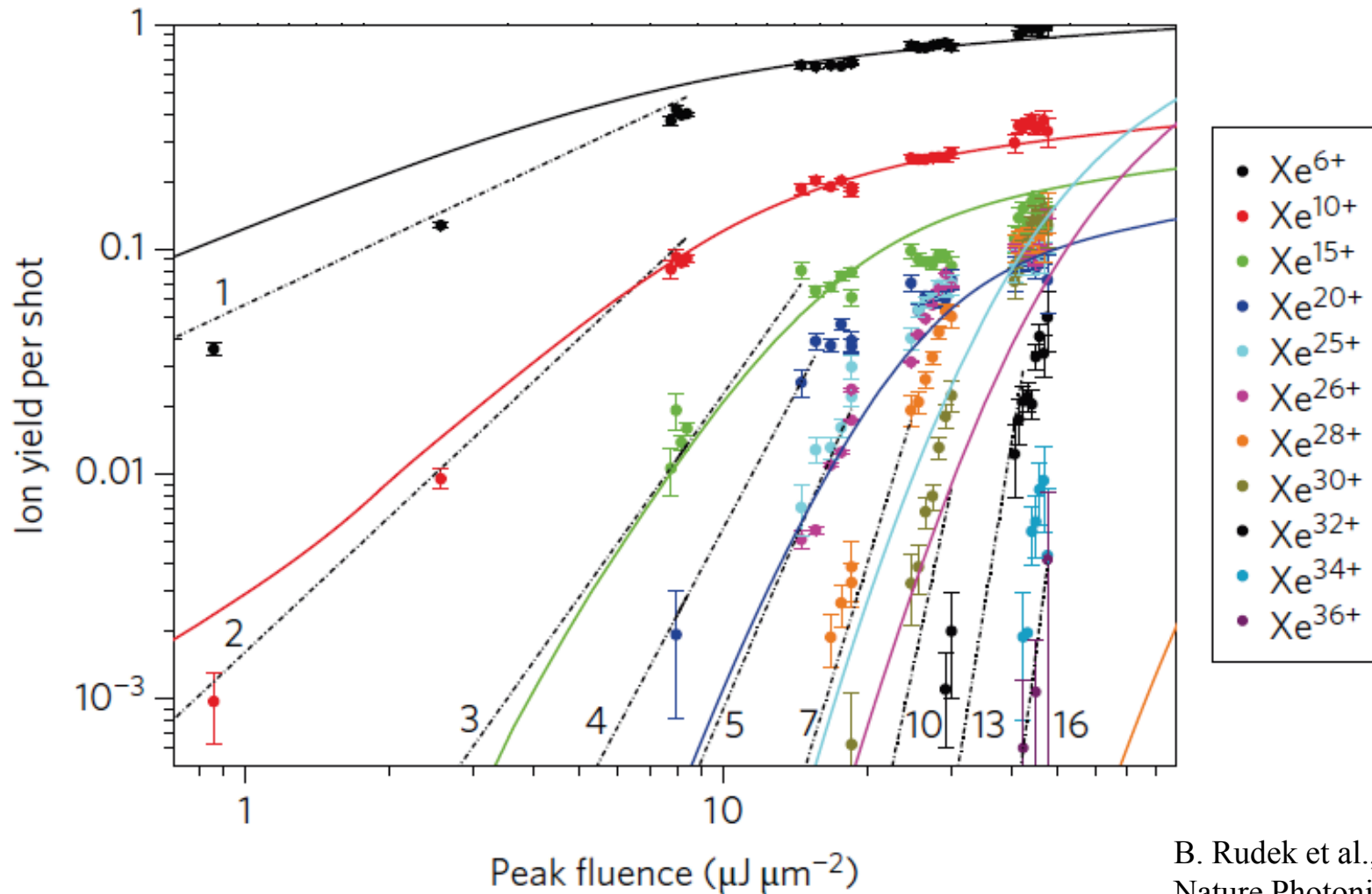
Skobeltsyn
Institute of Nuclear Physics

Lomonosov Moscow State University



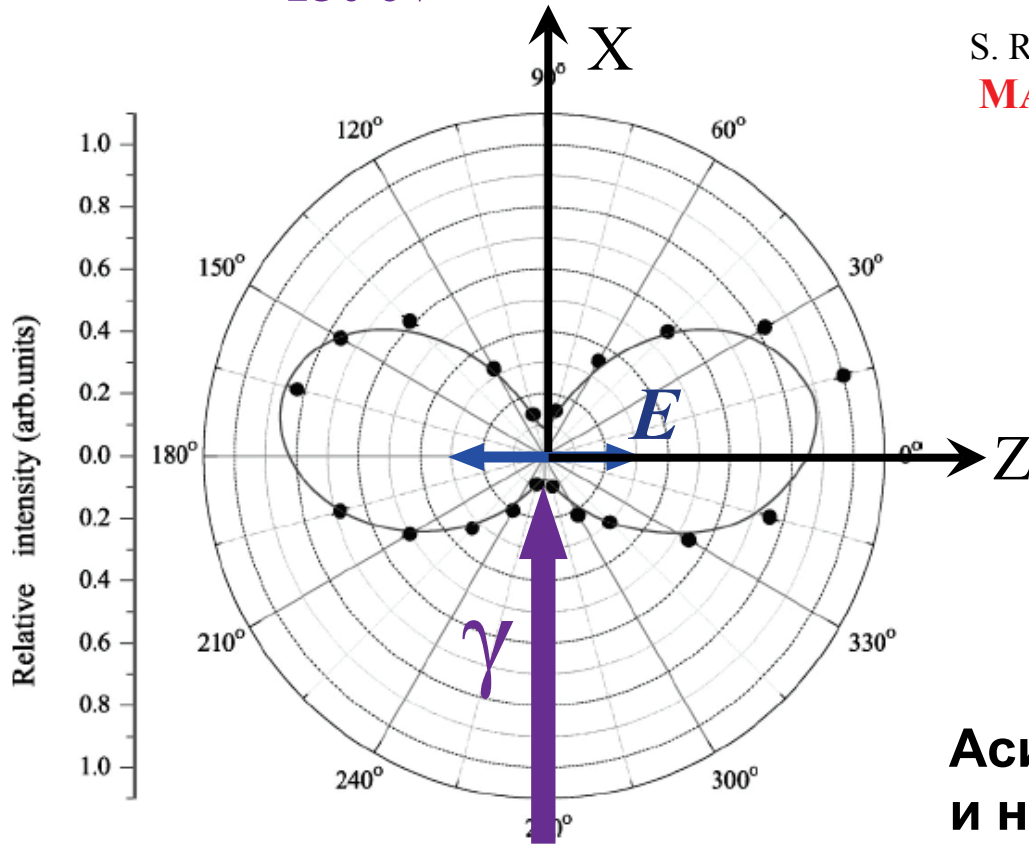
1.5 keV, ~80 fs, 3x3 μm^2

LCLS (Stanford)





150 eV



S. Ricz et al, Phys. Rev. A **67**, 012712 (2003)

MAX II experiment (Lund, Sweden)

**Асимметрия вперед-назад
и нарушение аксиальной
симметрии**

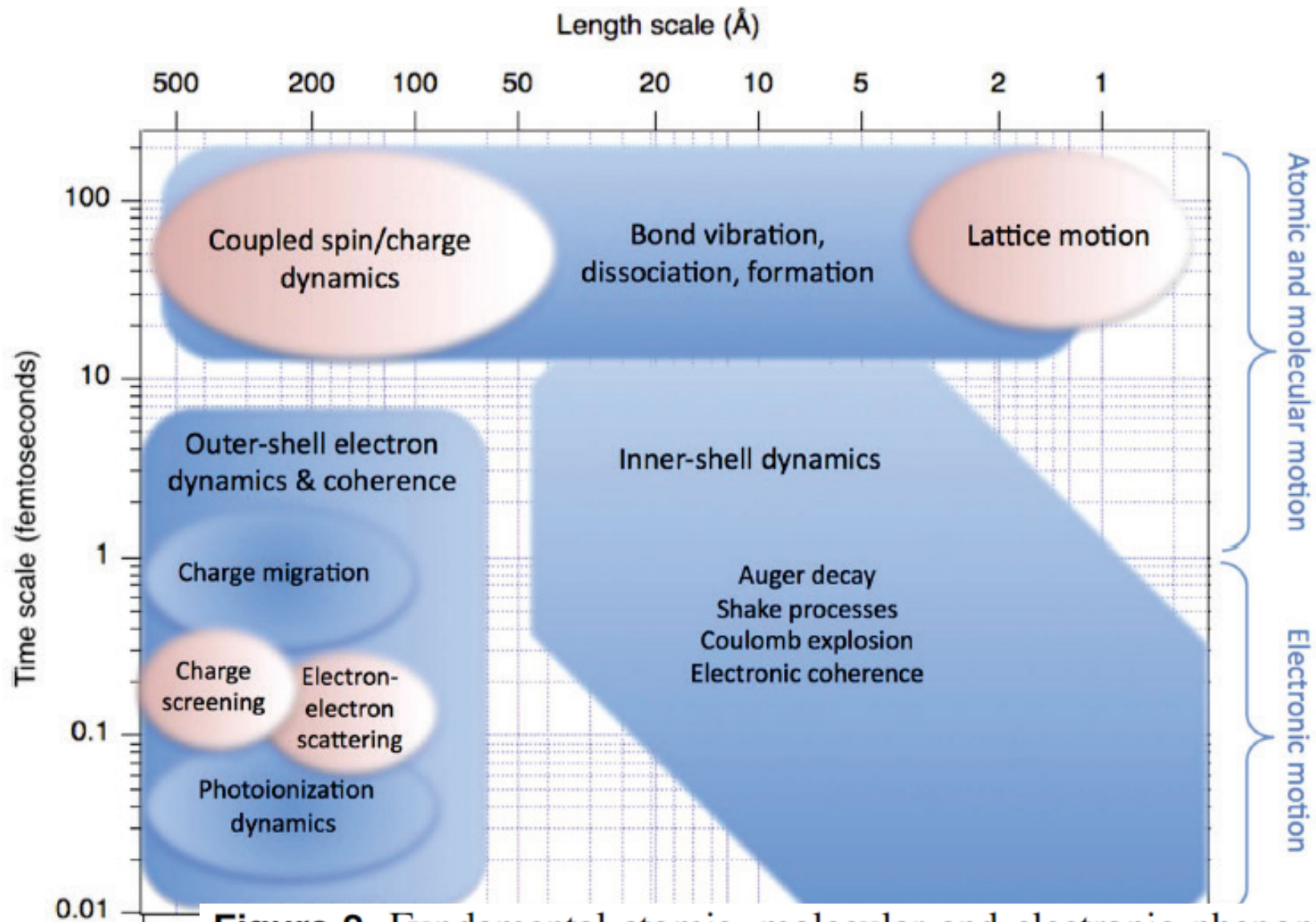
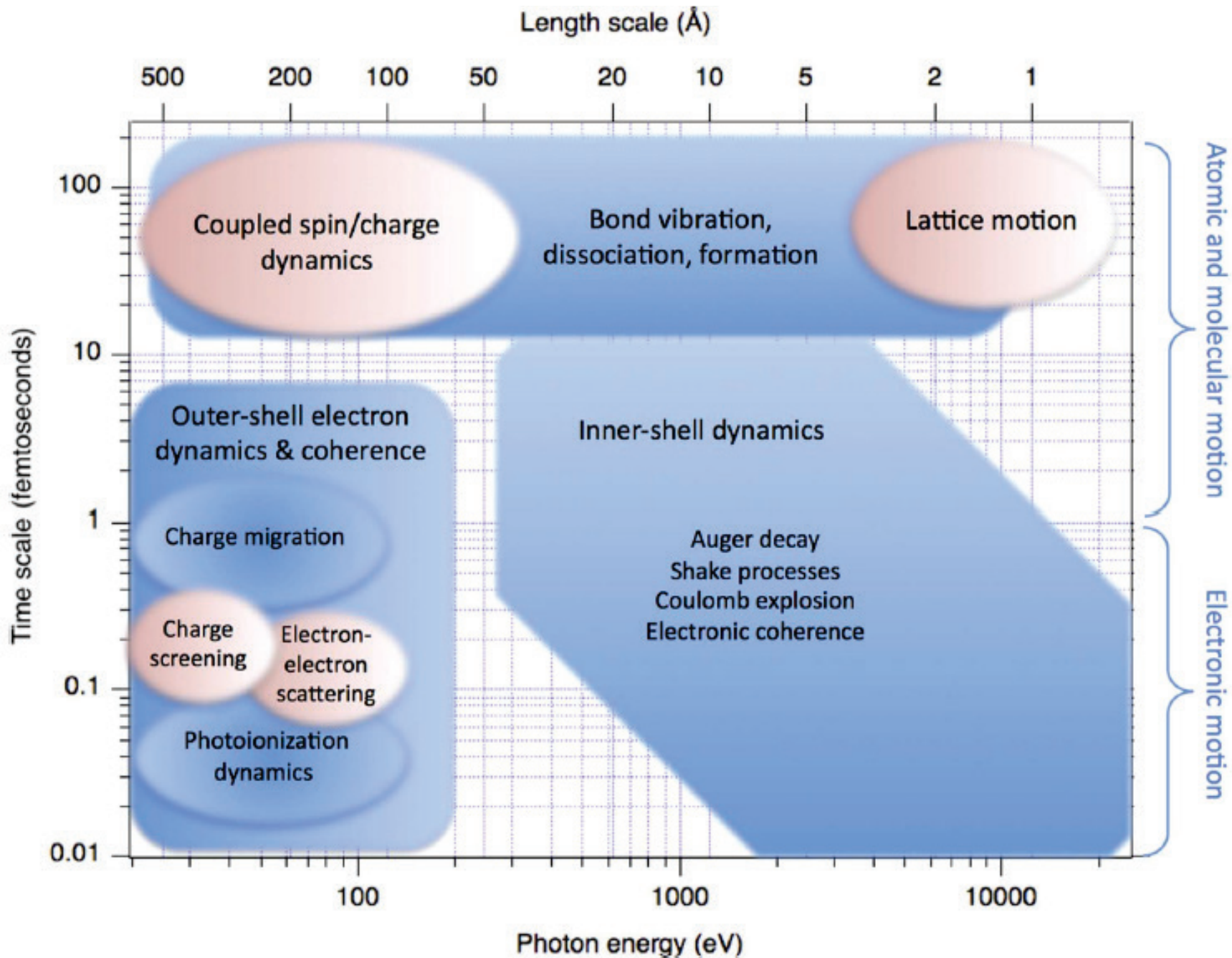


Figure 2. Fundamental atomic, molecular and electronic phenomena probed on ultrafast timescales (blue). Fundamental collective phenomena in the condensed phase probed on ultrafast timescales (pink).



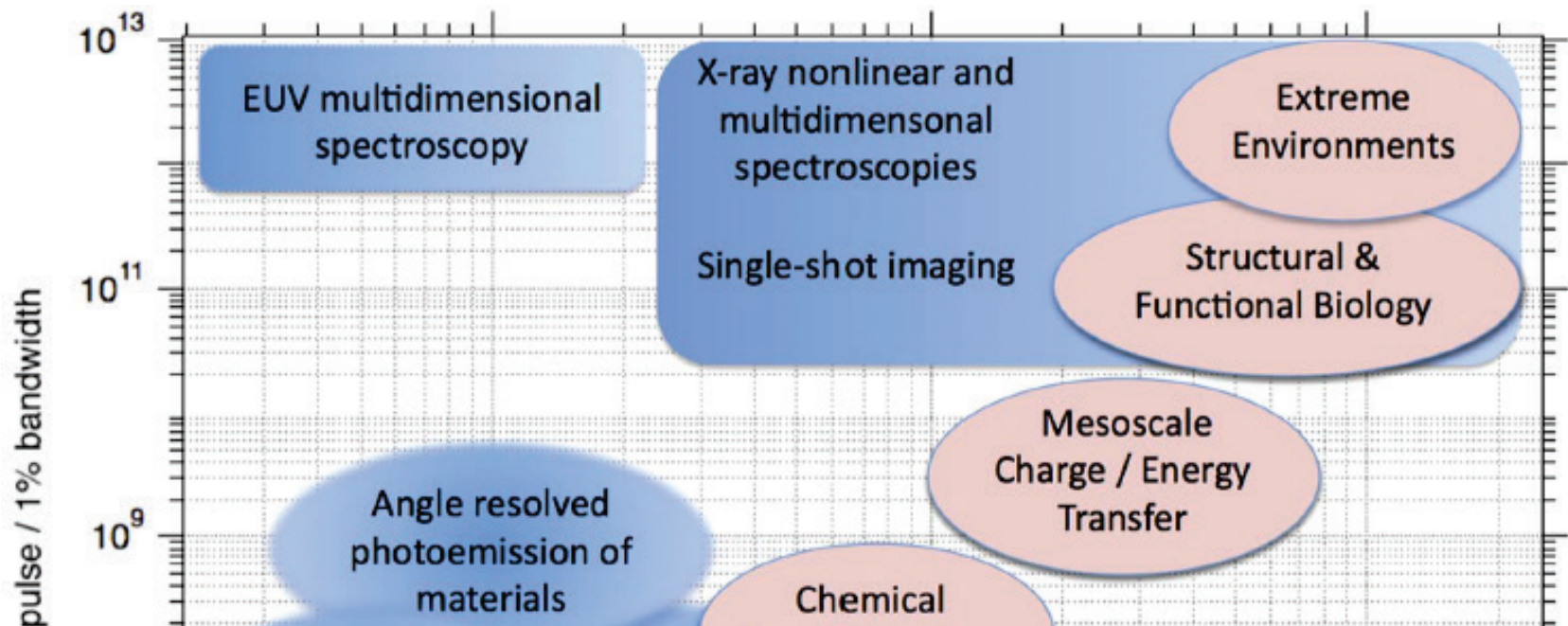
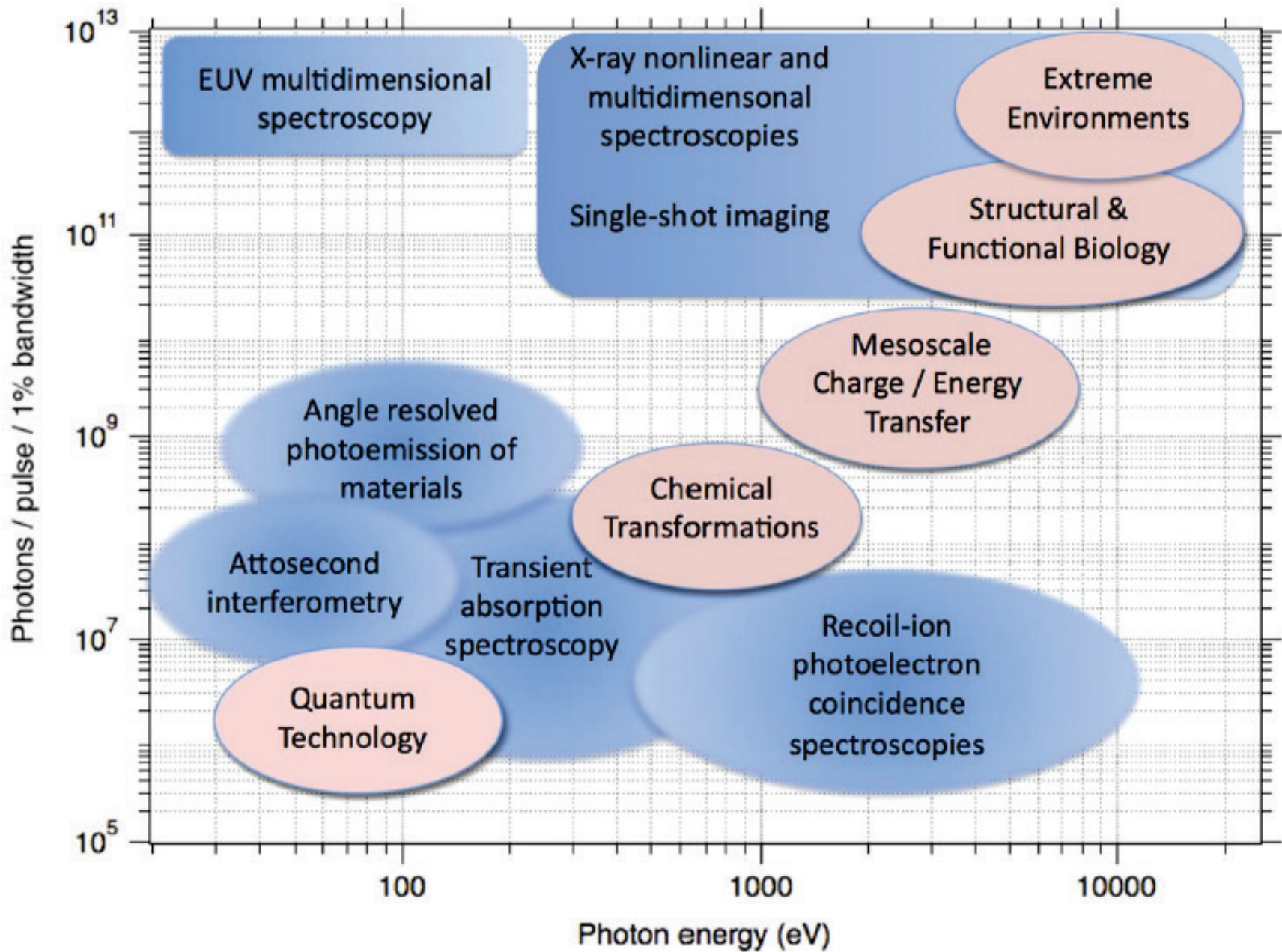


Figure 3. Experimental techniques used in ultrafast x-ray science mapped onto photon number per pulse and photon energy typically used (blue). The high-fluence regime enables nonlinear x-ray spectroscopies and single-shot imaging, potentially with atomistic resolution. Low fluences are employed to remain in the linear x-ray absorption regime to probe ultrafast transient processes. (Saturation fluence for a carbon atom at 290 eV, just above the K-edge, is $\sim 10^{10}$ photons/microns².) Overlaid are research areas addressed with ultrafast x-ray methodologies that stem from understanding fundamental atomic and molecular physics processes (pink).



ЛСЭ в ВУФ и рентгеновском диапазоне

FLASH (Германия) 2005	FERMI (Италия) 2012	LCLS (США) 2009	SACLA (Япония) 2011	XFEL (EU) 2018
30 – 300 эВ	12 - 310 эВ	0.27 - 9.5 кэВ	4.4-16.8 кэВ	0.25 - 12.4 кэВ
50 - 200 фс	30-100 фс	10 - 300 фс	30 фс	< 100 фс
$\sim 10^{13}$ ф/и	$10^{13} - 10^{14}$ ф/и	$10^{12} - 10^{13}$ ф/и	$5 \cdot 10^{11}$ ф/и	$10^{12} - 10^{14}$ ф/и
$> 10^{11}$ Вт /см²	$5 \cdot 10^{12}$ Вт /см²	$> 10^{11}$ Вт /см²		$> 10^{11}$ Вт /см²
ВУФ		рентген		

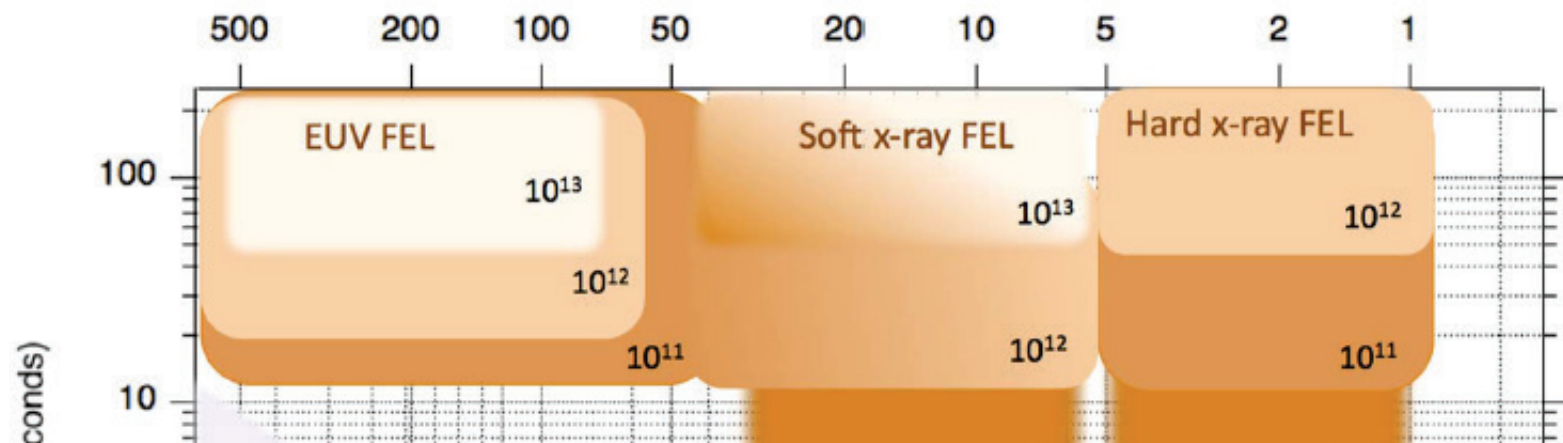


Figure 1. Phase space covered by the XFEL and HHG sources discussed in this roadmap. For XFELs, the pulse duration represents that of a single pulse, whereas for HHG, the range spans both single pulses and pulse trains spaced by the period of the driver laser. The numbers in each island indicate the number of photons/pulse/1% bandwidth. Research to extend the limits of all represented quantities, photon energy, time scale and photon number per pulse, is pursued for both XFEL and HHG sources. The emphasis for XFELs is to extend the time scale to the attosecond regime and photon energy above 20 keV; the emphasis for HHG is to extend the photon energy range to hard x-ray and photon number per pulse. For properties not represented by these basic quantities, XFELs seek enhanced temporal coherence and synchronization with external sources, and both sources seek increased average power and controlled polarization.