

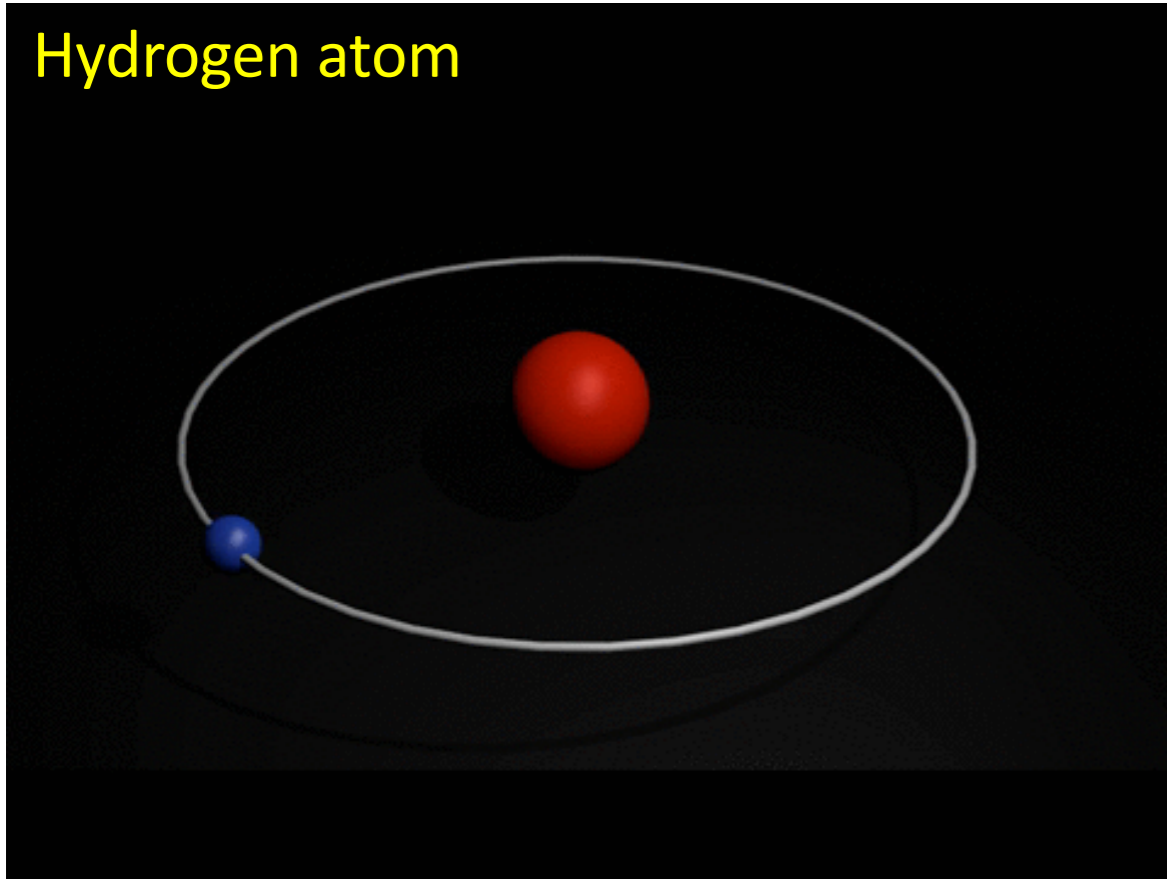
Влияние фазы несущей лазерного импульса (carrier envelope phase) на генерацию аттосекундных импульсов от поверхности плазмы

**Сергей Рыкованов
Сколковский Институт Науки и Технологий**

Our natural curiosity requires faster and shorter scales

Can we see the motion of electrons?

Hydrogen atom



Bohr radius ~ 1.5 Angstrom

Bohr orbit period ~ 150 attoseconds

$$1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$$

$$1 \text{ as} / 1 \text{ s} \sim 1 \text{ s} / \text{age of Universe}$$

"One of the primary goals of attosecond science is to provide more insights into the dynamics of atomic electrons."

P. Agostini, L.F. DiMauro, Reports on Progress in Physics, 67, 813 (2004)

Pump-probe technique

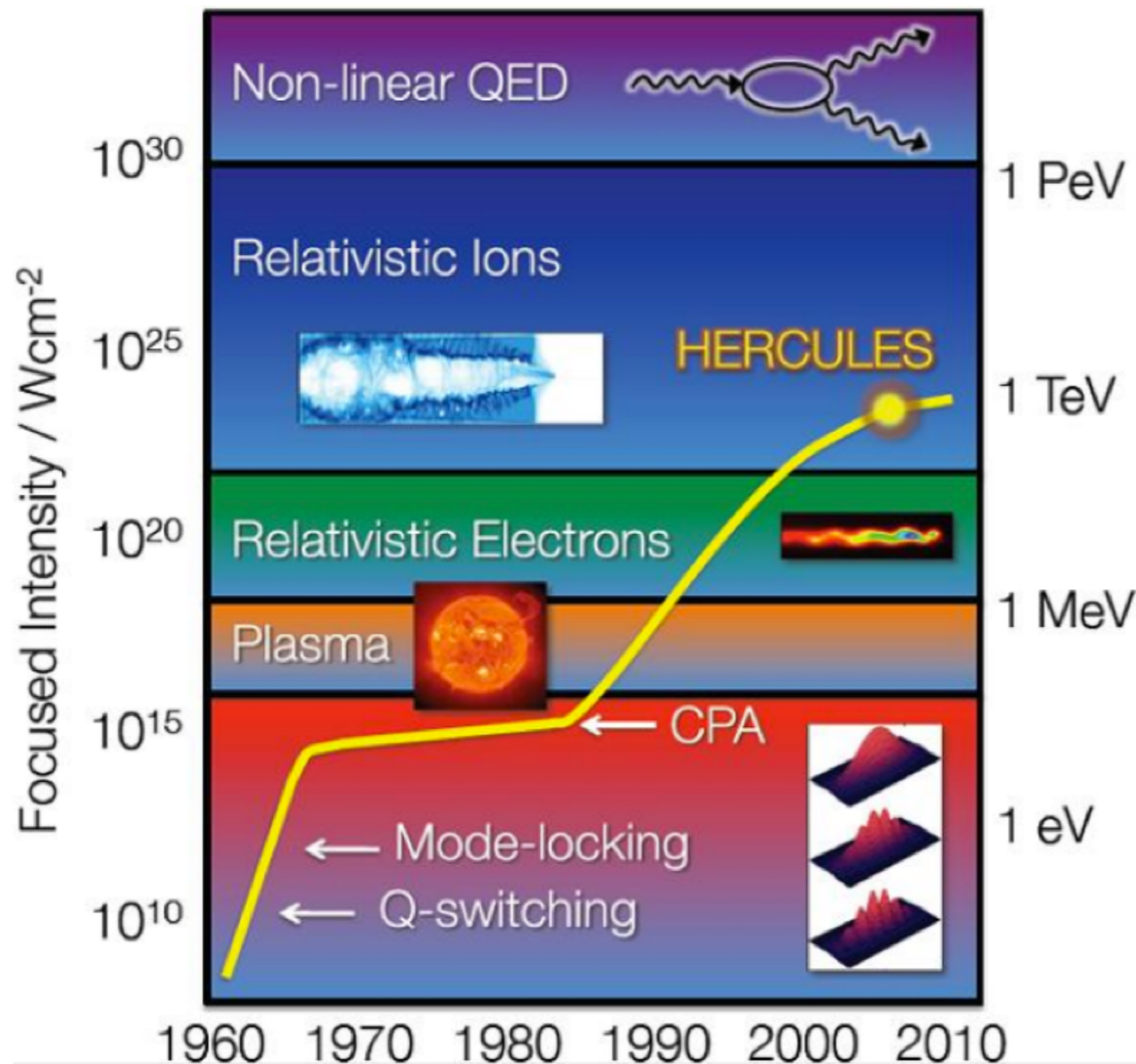
Pump-probe
technique

The background of the slide features a series of concentric, semi-transparent circles in shades of light blue, green, and yellow, creating a ripple effect that radiates from the center.

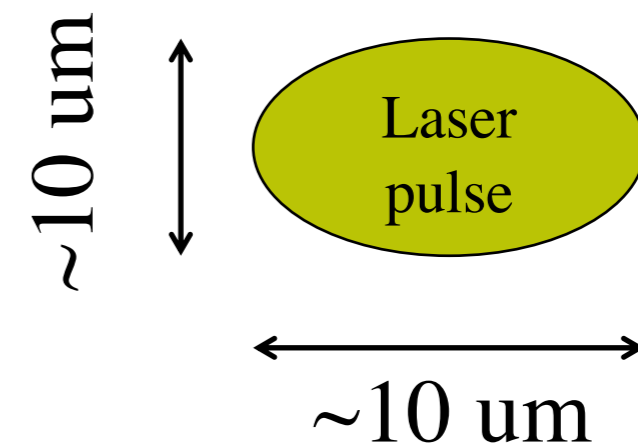
Quest for more intense laser pulses

Intensity = Energy / Unit Surface / Unit time

Sun Intensity on Earth surface $\sim 0.1 \text{ W cm}^{-2}$



- 1985 CPA (Chirped Pulse Amplification)
- Petawatt laser systems (10^{15} Watt)
- **World power production $\sim 10^{13}$ Watt**
- Ultrashort pulses (femtosecond)
- 1 femtosecond = 10^{-15} seconds



- 10 times smaller than human hair

Picture credit: CUOS, University of Michigan

Harmonics and attosecond physics

Heisenberg uncertainty:

$$\Delta\omega\Delta\tau = 2\pi$$

If we want short pulses – we need a broad spectrum

Physics Letters A 168 (1992) 447–450
North-Holland

PHYSICS LETTERS A

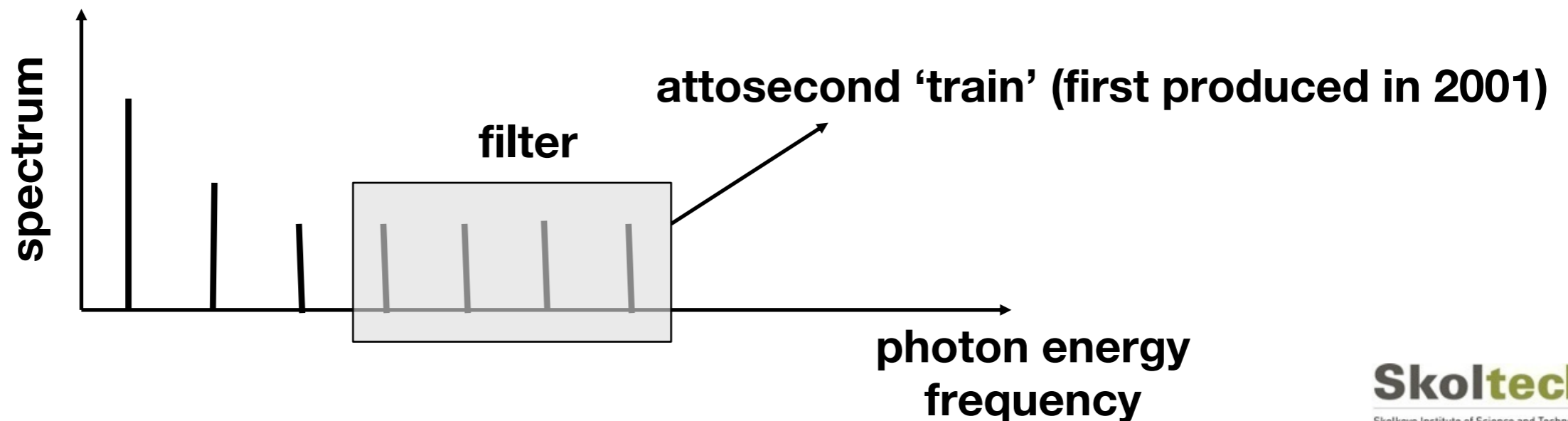
Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases

Gy. Farkas and Cs. Tóth

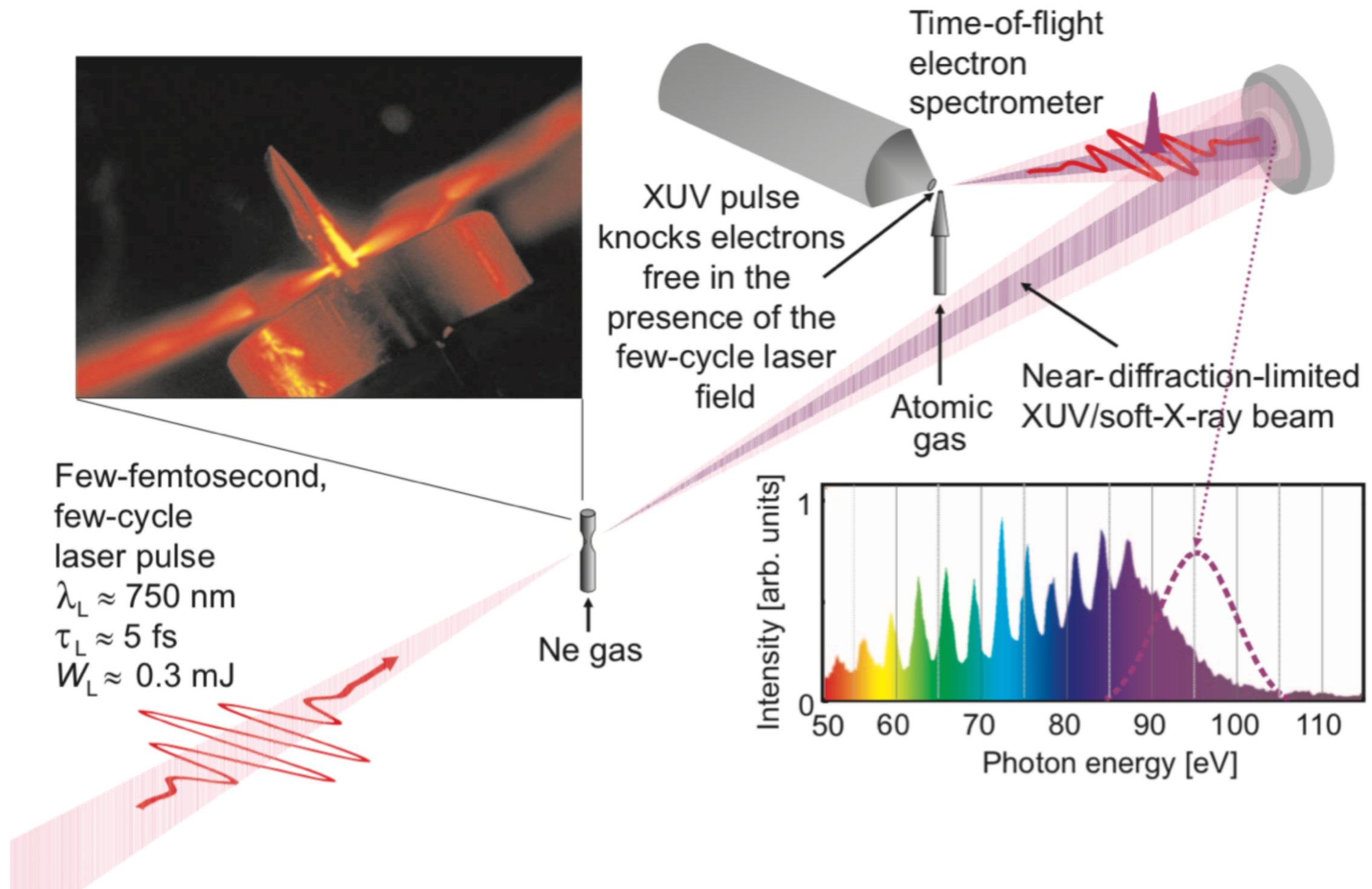
Research Institute for Solid State Physics, Central Research Institute for Physics, P.O. Box 49, H-1525 Budapest, Hungary

Received 11 June 1992; accepted for publication 13 July 1992

Communicated by V.M. Agranovich

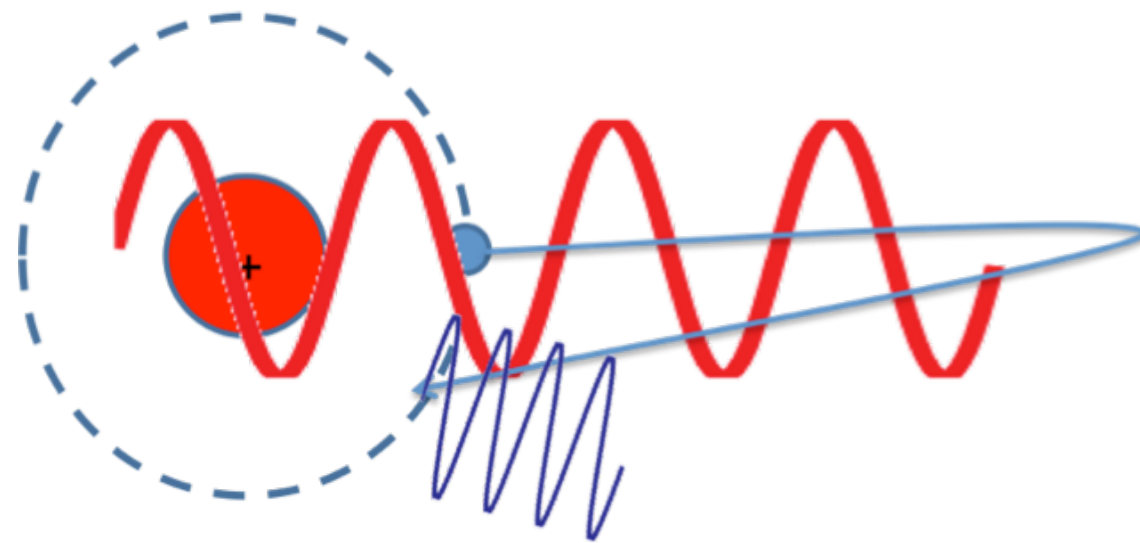


Attosecond beamline



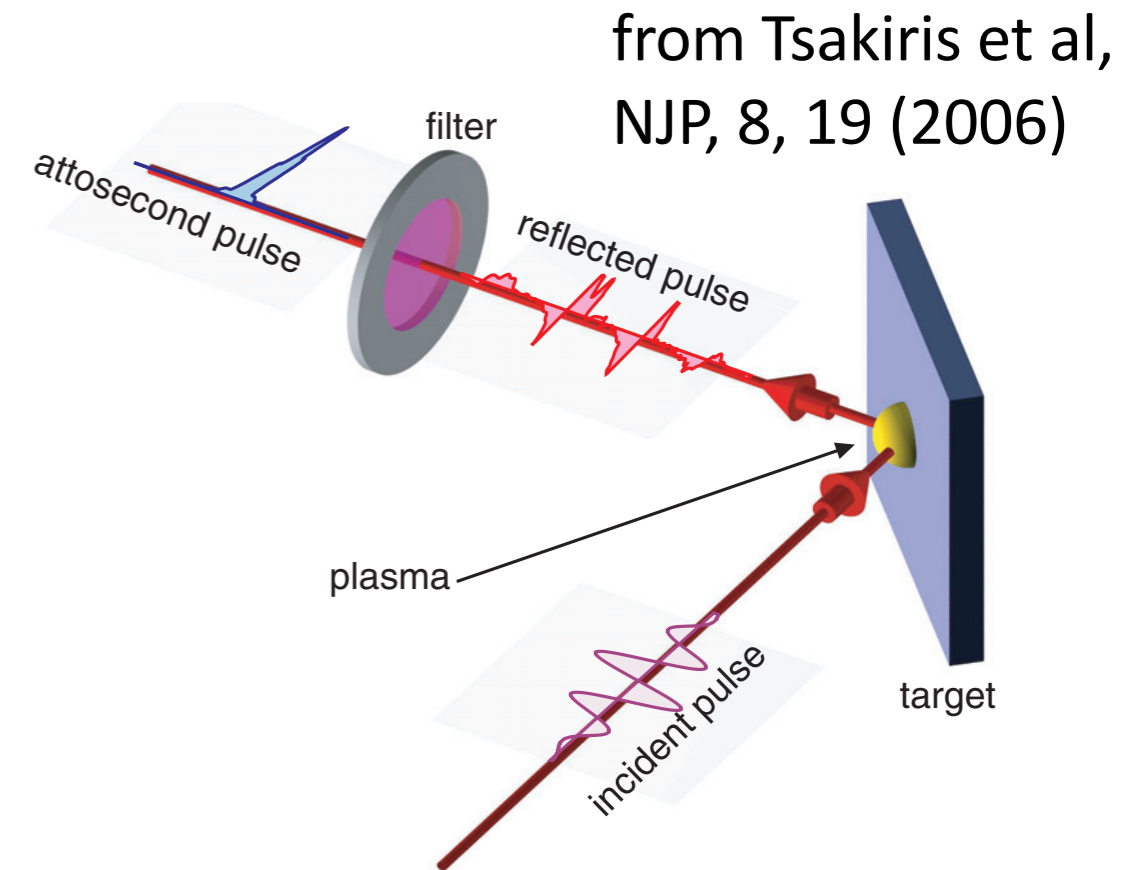
Picture from F. Krausz and M. Ivanov, RMP, 81, 163 (2009)

Plasma medium for high peak number of UV photons



Atomic medium:

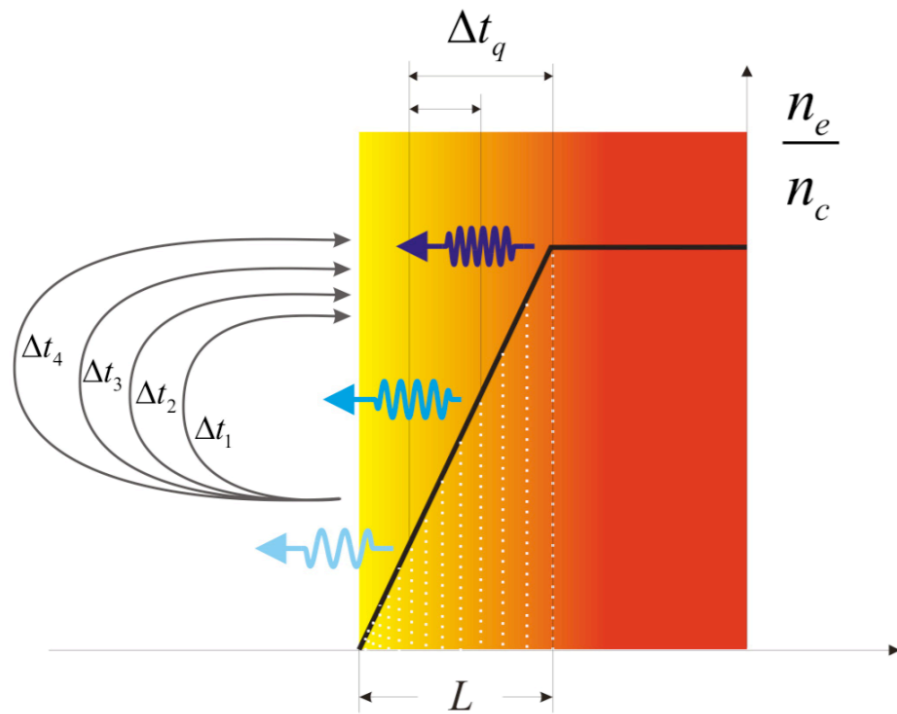
- **high average photon number**
- **low peak photon number**
- IR pump – UV probe
- hard to reach water window



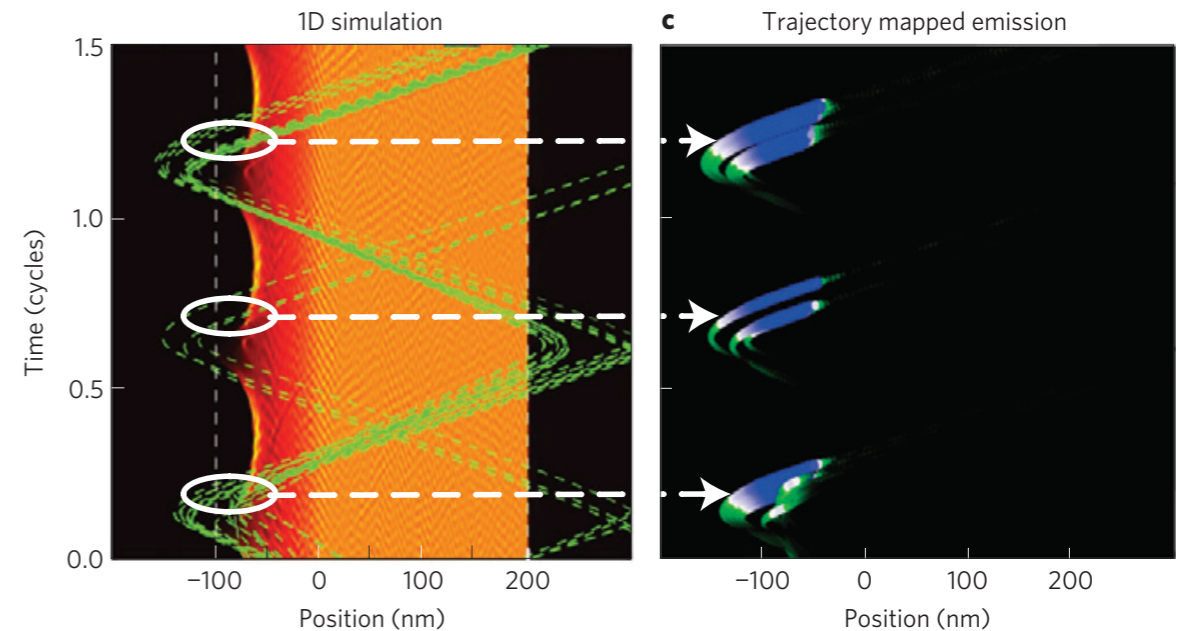
Plasma medium:

- **low average photon number**
- **high peak photon number**
- UV pump – UV probe
- water window within reach

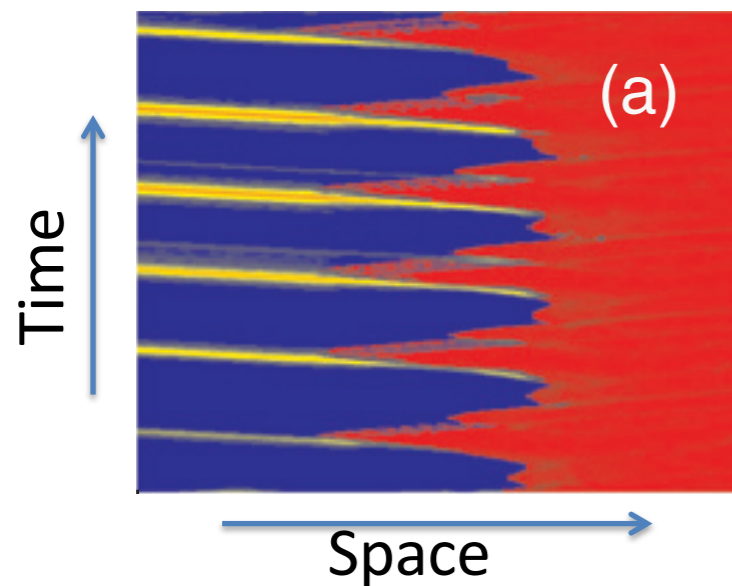
Mechanisms of surface harmonics generation



Coherent Wake Emission¹



Coherent Synchrotron Emission²

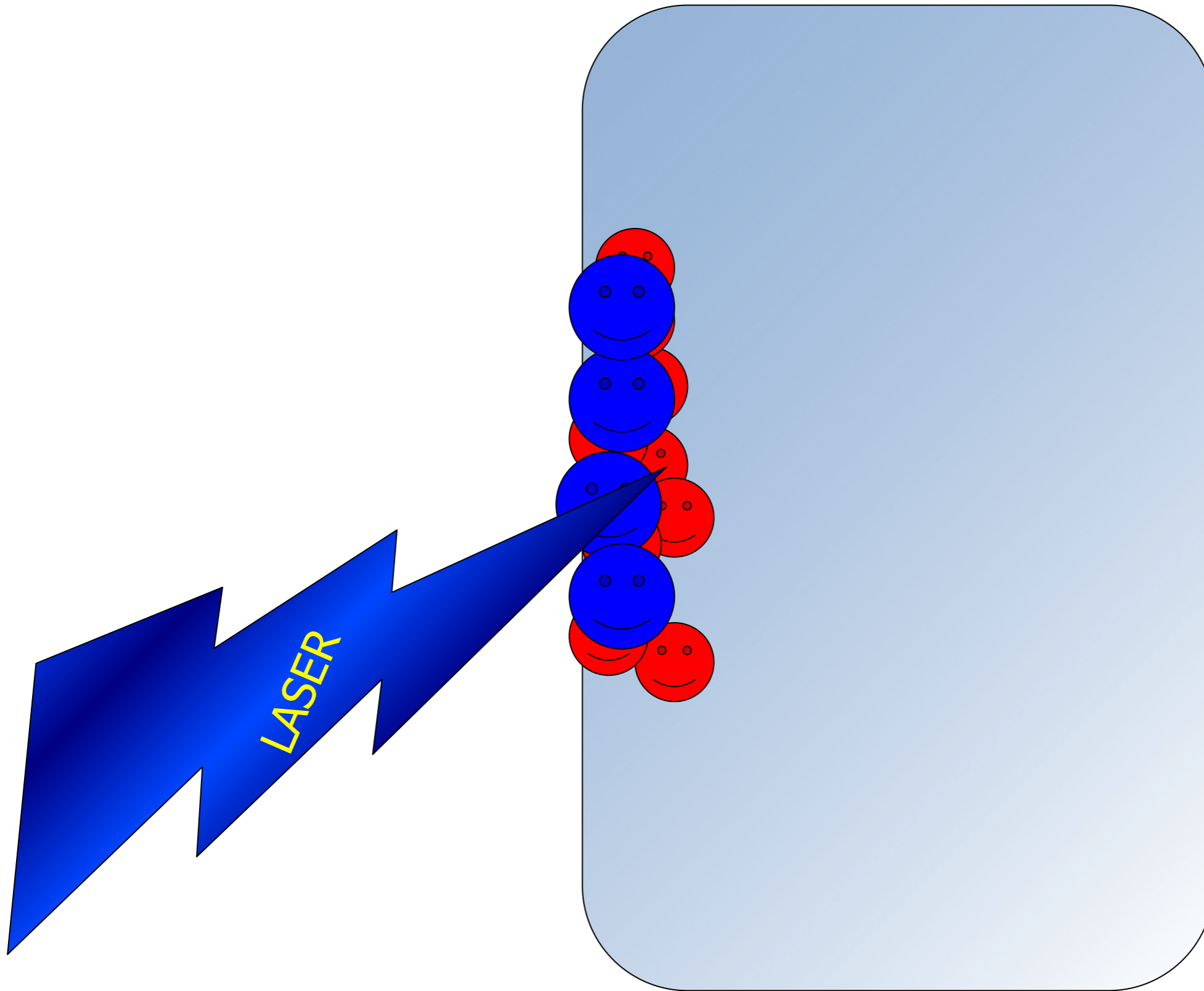


Oscillating Mirror³

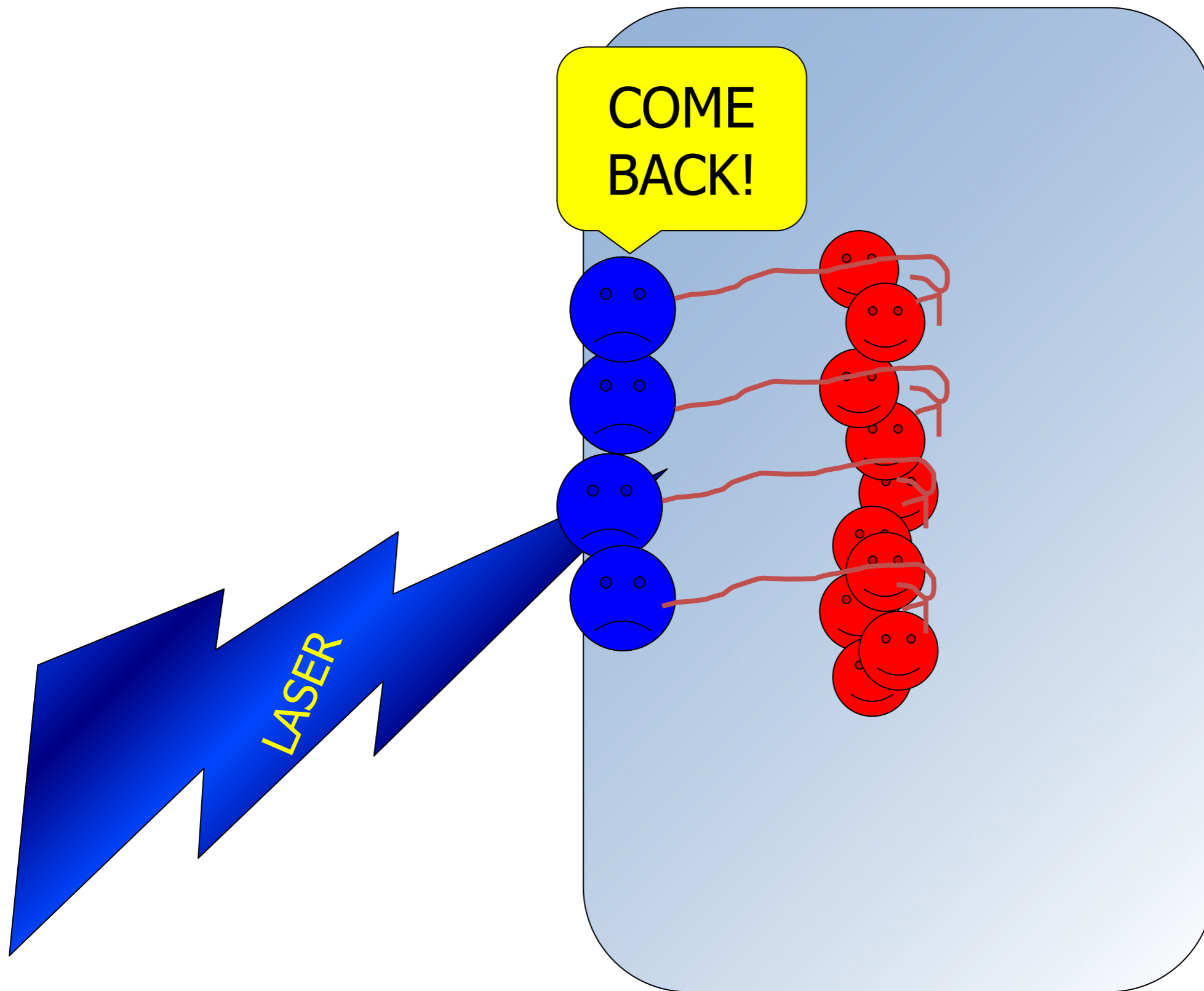
Pictures from:

1. Nomura, et al, Nat. Phys., 5, 124 (2009)
2. Dromey, et al, Nat. Phys., 8, 804 (2012)
3. Rykovanov, et al, NJP, 10, 025025 (2008)

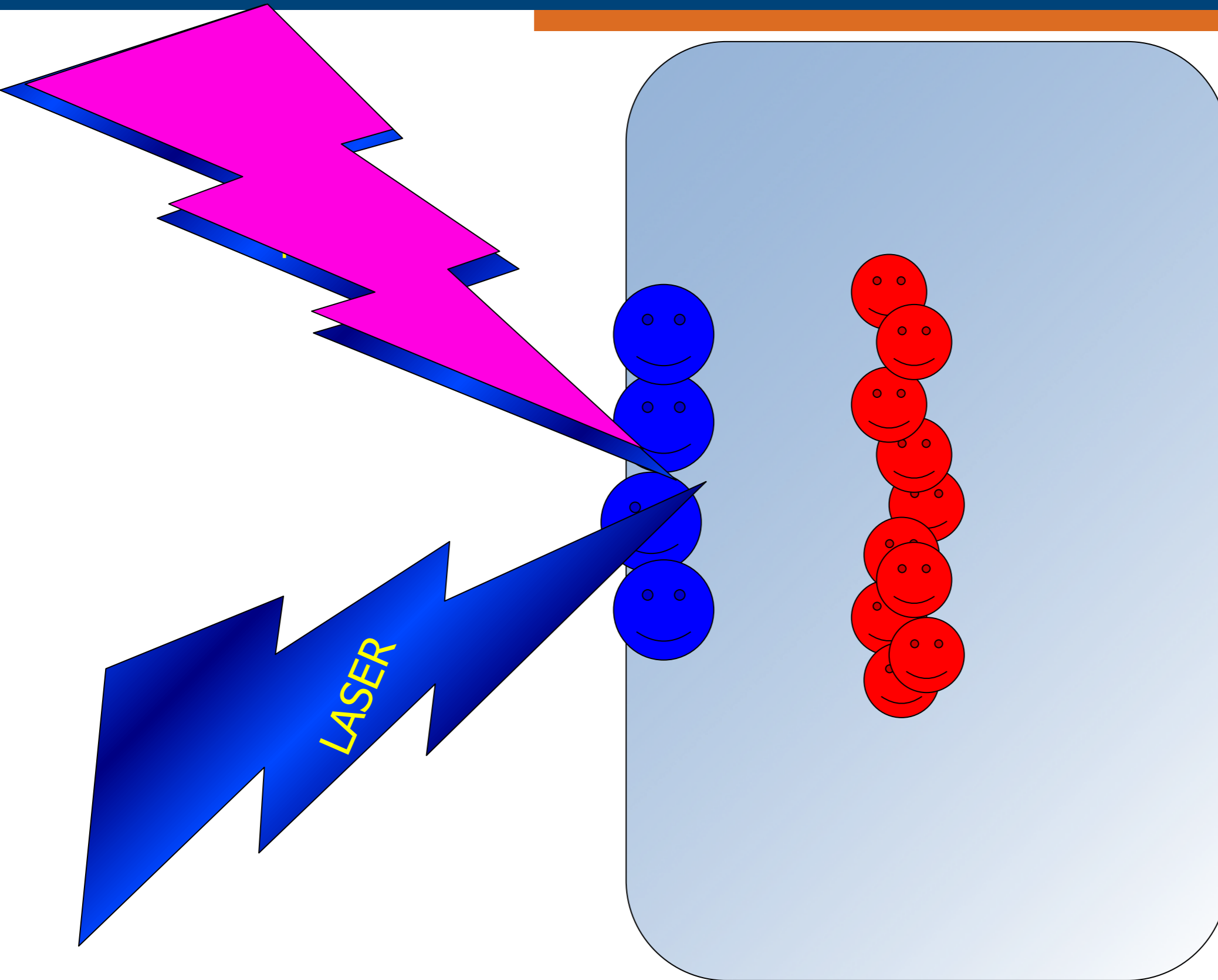
Oscillating mirror model



Oscillating mirror model



Oscillating mirror model



Spatial and temporal coherence

LETTERS
PUBLISHED ONLINE 14 DECEMBER 2009; DOI:10.1038/NPHYS2833

nature physics

Attosecond phase locking of harmonics emitted from laser-produced plasmas

Y. Nomura^{1*}, R. Hürdel^{2,3*}, P. Tzallas², B. Dromey², S. Rykovanov^{2,4}, Zs. Major², J. Osterhoff¹, S. Karsch¹, L. Veisz², M. Zepf¹, D. Charalambidis^{2,6}, F. Krausz^{1,2} and G. D. Tsakiris¹

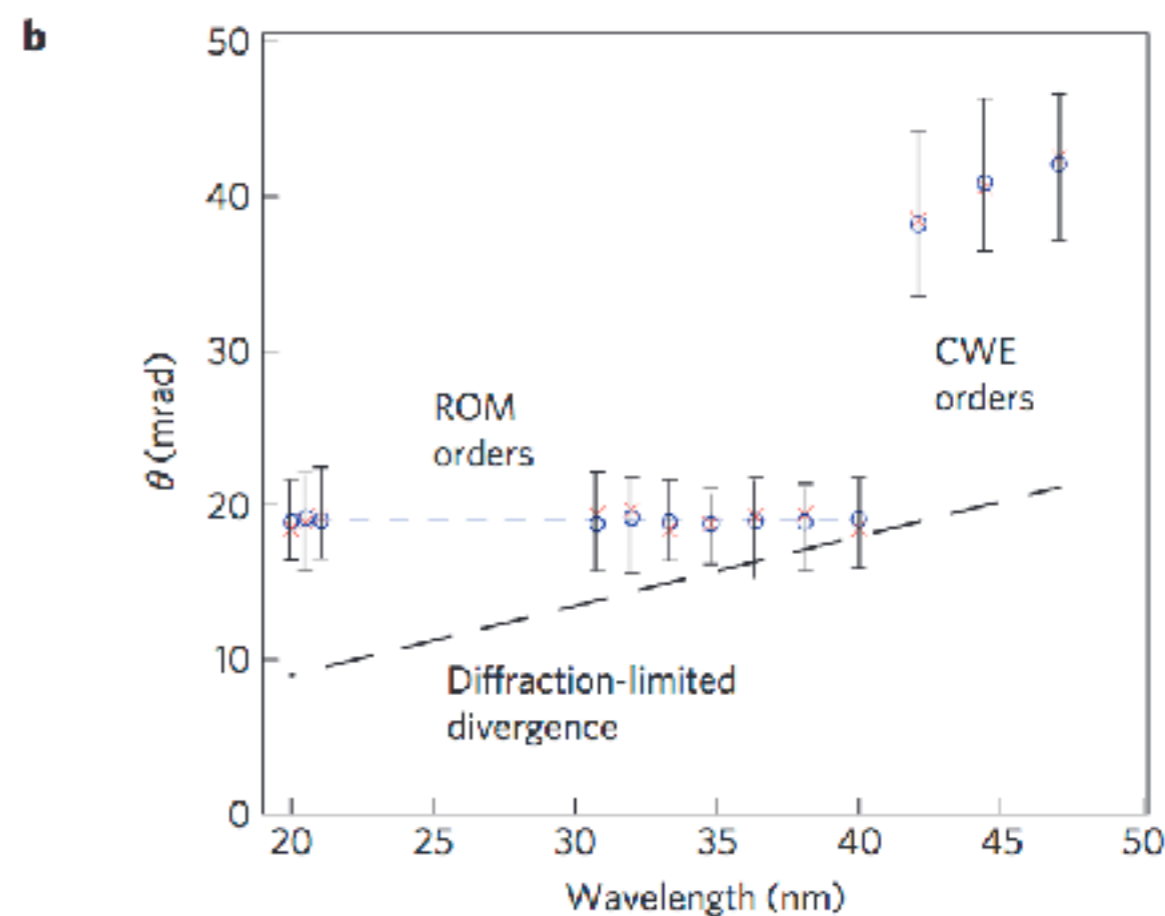
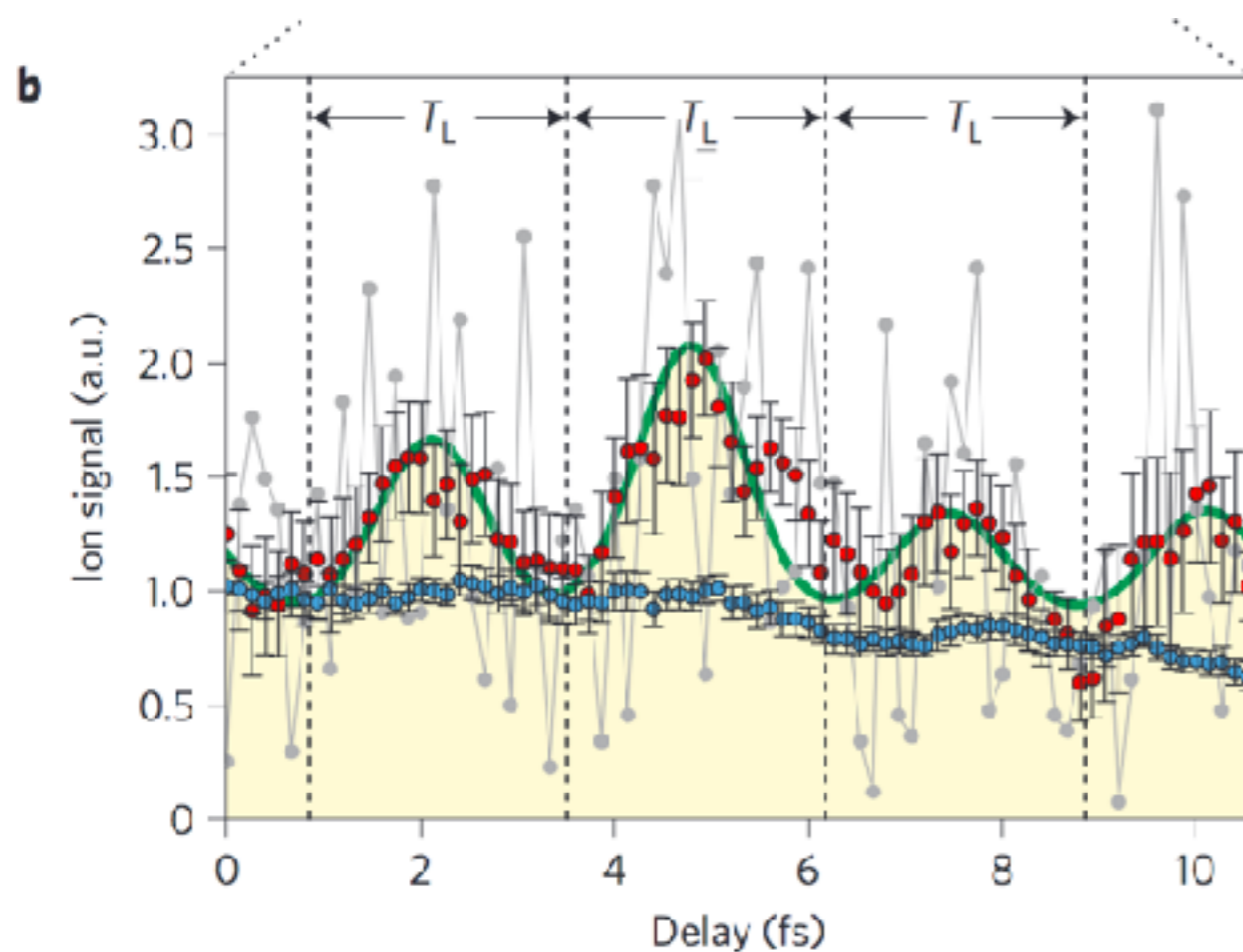
ARTICLES
PUBLISHED ONLINE 11 JANUARY 2010; DOI:10.1038/NPHYS3153

nature physics

Diffraction-limited performance and focusing of high harmonics from relativistic plasmas

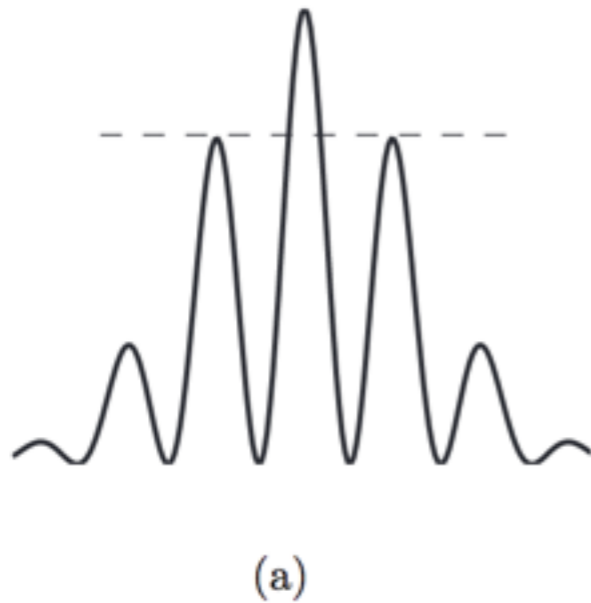
B. Dromey¹, D. Adams¹, R. Hürdel^{2,3}, Y. Nomura², S. G. Rykovanov^{2,4}, D. C. Carroll⁵, P. S. Foster⁶, S. Kar¹, K. Markey¹, P. McKenna⁶, D. Neely⁴, M. Geissler³, G. D. Tsakiris² and M. Zepf^{1*}

temporal structure

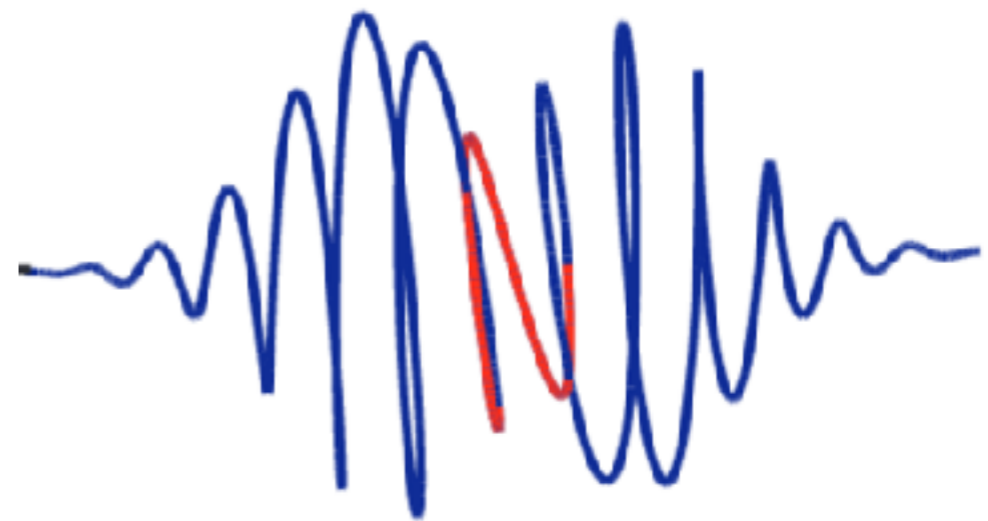


Gating of single attosecond pulses

Intensity gating

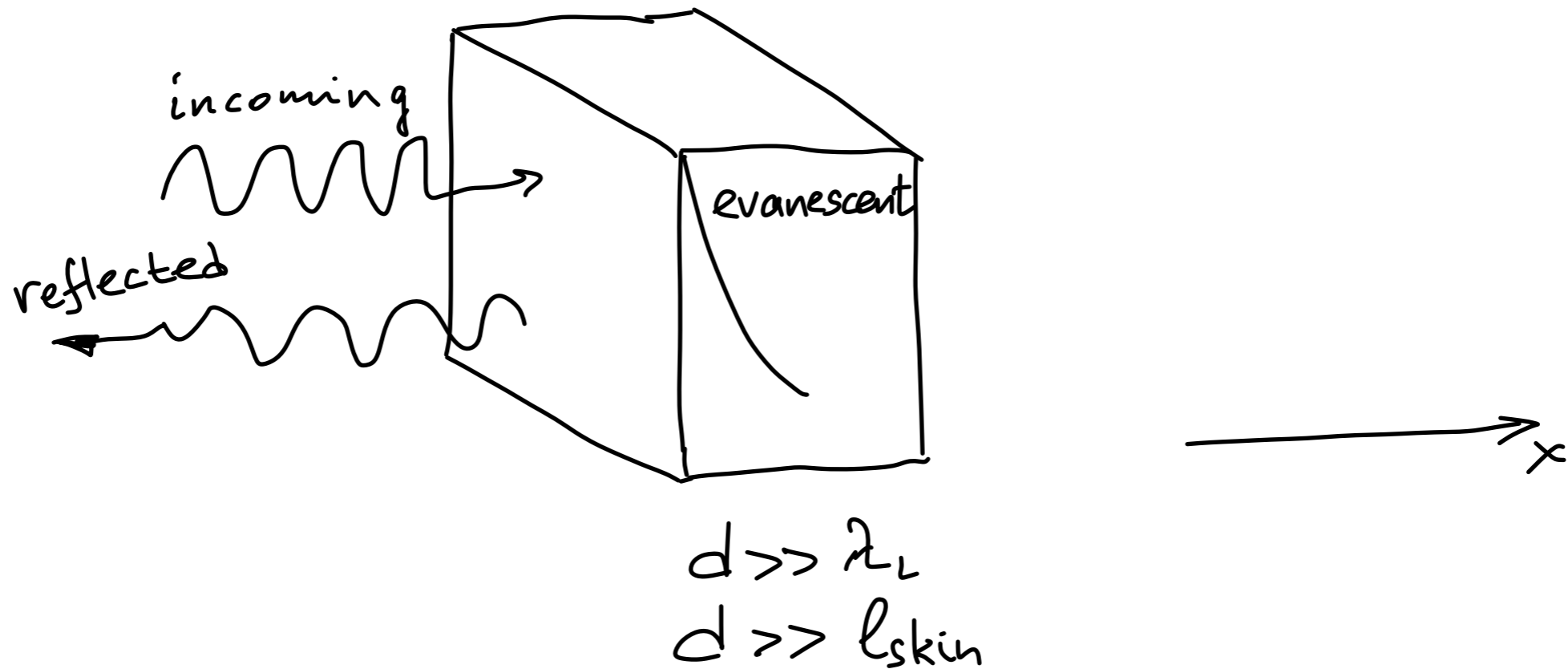


Polarization gating



+ other techniques (i.e. attosecond lighthouse)

Влияние фазы несущей (carrier envelope phase) на генерацию аттосекундных импульсов



Всё еще:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{E} - \frac{\vec{v} \times \vec{B}}{\gamma}$$

$$E_x = \mathcal{N}_e \cdot \mathcal{X}_e$$

restoring force of
oscillator

Граничные условия

Поперечные электромагнитные поля непрерывны:

На поверхности:

$$\vec{A}_{\text{incoming}} + \vec{A}_{\text{reflected}} = \vec{A}_{\text{evanescent}} \quad \left(+ \text{ то же } \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right)$$

В общем виде

$$A_{\text{incoming}, y} = a_0 \cdot g(t-x) \cdot \sin(t-x + \varphi_0)$$

$$A_{\text{reflected}, y} = a_r \cdot g(t+x) \cdot \sin(t+x + \varphi_r)$$

$$A_{\text{evanescent}, y} = a_t \cdot g(t) \cdot \sin(t + \varphi_t) \cdot f(x)$$

$f(x)$ - скин слой, зависит от параметров плазмы

В простейшем случае: $f(x) = e^{-x/l_s}$; $l_s = \frac{1}{\omega_p}$

Граничные условия

Непрерывность электрического поля

$$a_0 \cos(t + \varphi_0) + a_r \cos(t + \varphi_r) = a_t \cos(t + \varphi_t) f(0)$$

Непрерывность магнитного поля

$$a_0 \cos(t + \varphi_0) - a_r \cos(t + \varphi_r) = -a_t \sin(t + \varphi_t) f'(0)$$

$$a_t = \frac{2a_0}{\sqrt{1 + \omega_p^2}}$$

$$\varphi_t = \varphi_0 - \arctan\left(\frac{f'(0)}{f(0)}\right)$$

$$\varphi_r = \varphi_0 - 2 \arctan\left(\frac{f'(0)}{f(0)}\right)$$

$f(x)$ из волнового ур-я:

$$\square \vec{a} = \vec{j} = -n(x) \vec{v}$$

Все поля известны, можем смотреть на (слаборелятивистскую) динамику

Граничные условия

Непрерывность электрического поля

$$a_0 \cos(t + \varphi_0) + a_r \cos(t + \varphi_r) = a_t \cos(t + \varphi_t) f(0)$$

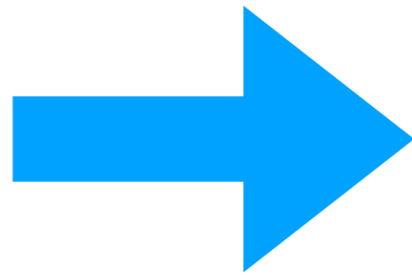
Непрерывность магнитного поля

$$a_0 \cos(t + \varphi_0) - a_r \cos(t + \varphi_r) = -a_t \sin(t + \varphi_t) f'(0)$$

$$a_t = \frac{2a_0}{\sqrt{1 + \omega_p^2}}$$

$$\varphi_t = \varphi_0 - \arctan\left(\frac{f'(0)}{f(0)}\right)$$

$$\varphi_r = \varphi_0 - 2 \arctan\left(\frac{f'(0)}{f(0)}\right)$$



Ступенька

$$\varphi_t = \varphi_0 + \arctan\left(\sqrt{\omega_p^2 - \omega_0^2}\right)$$

Линейная преплазма

$$\varphi_t = \varphi_0 + \arctan\left(\frac{\left(\frac{n_0}{L}\right)^{1/3} \text{Ai}'\left(-\omega_0^2 \left(\frac{n_0}{L}\right)^{-2/3}\right)}{\text{Ai}\left(-\omega_0^2 \left(\frac{n_0}{L}\right)^{-2/3}\right)}\right)$$

Все поля известны, можем смотреть на (слаборелятивистскую) динамику

Динамика плазмы - осциллирующее зеркало

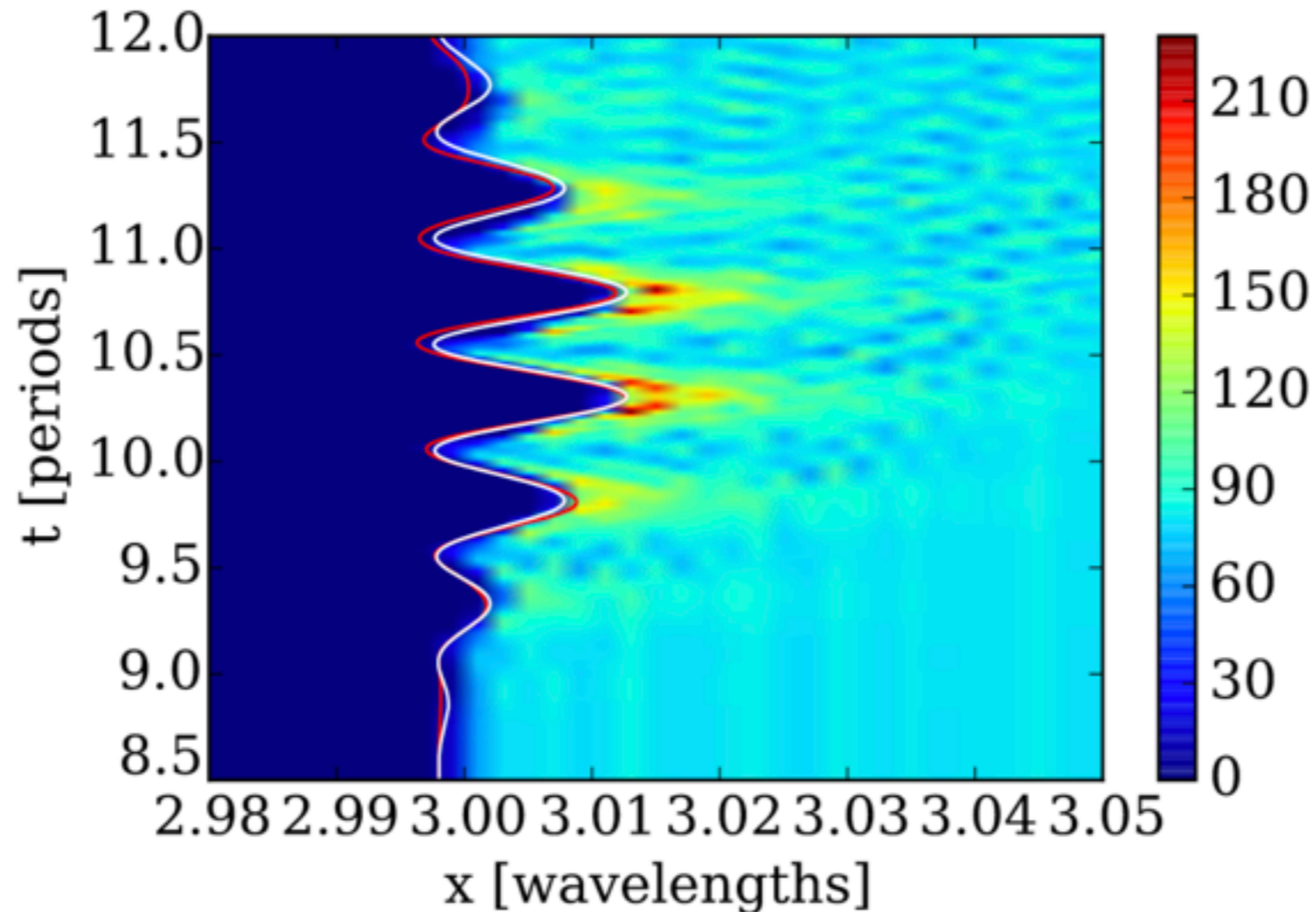


FIG. 1. Spatio-temporal electron density distribution from 1D PIC simulation using the code PICWIG, zoomed on the plasma surface. The surface oscillates, as the laser is interacting with the plasma. Analytic solution (solid white line) and numeric solution (solid red line) for a single particle are shown for comparison. The parameters were $n = 81$, $a_0 = 5$ and a laser pulse with a \sin^2 -envelope and duration of 4 optical cycles and linear polarization has been used.

Влияние фазы несущей и параметров плазмы

Ступенька

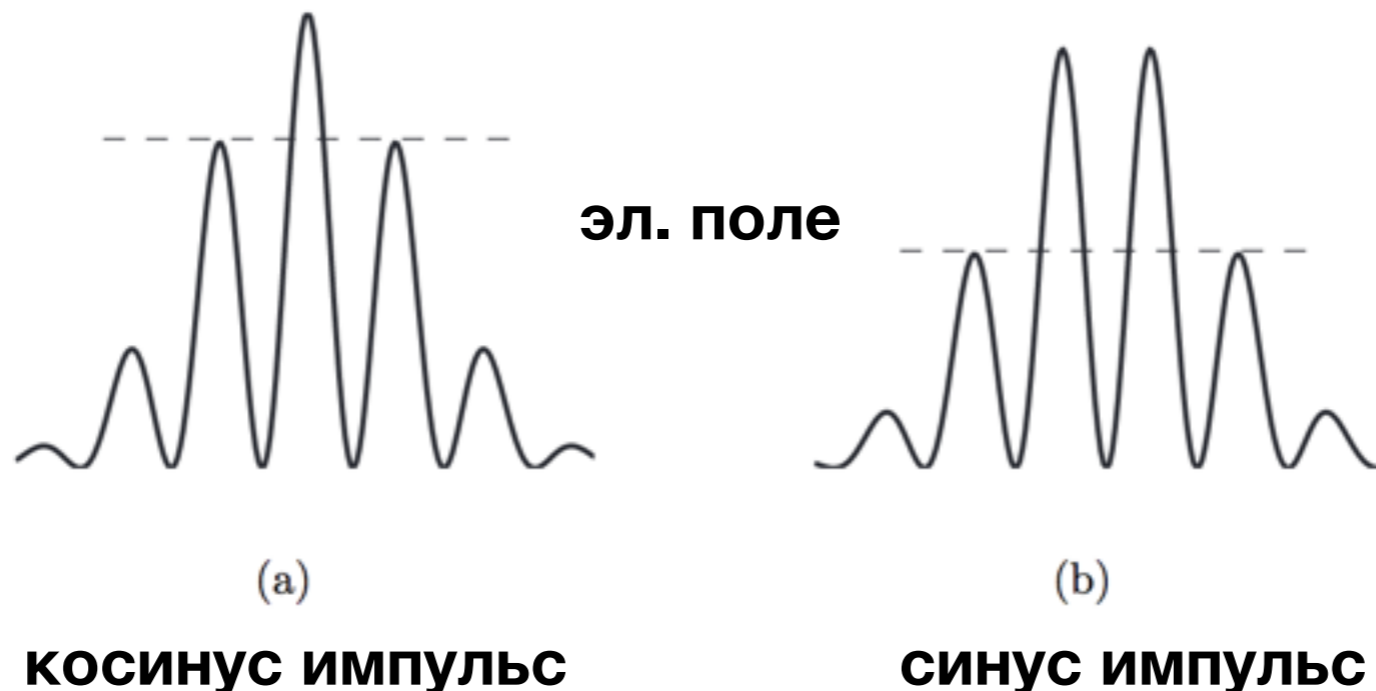
$$\varphi_t = \varphi_0 + \arctan \left(\sqrt{\omega_p^2 - \omega_0^2} \right)$$

Линейная преплазма

$$\varphi_t = \varphi_0 + \arctan \left(\frac{\left(\frac{n_0}{L}\right)^{1/3} \text{Ai}' \left(-\omega_0^2 \left(\frac{n_0}{L}\right)^{-2/3}\right)}{\text{Ai} \left(-\omega_0^2 \left(\frac{n_0}{L}\right)^{-2/3}\right)} \right)$$

Фаза вынуждающего поля, зависящая от параметров плазмы

Intensity gating for single attosecond pulses



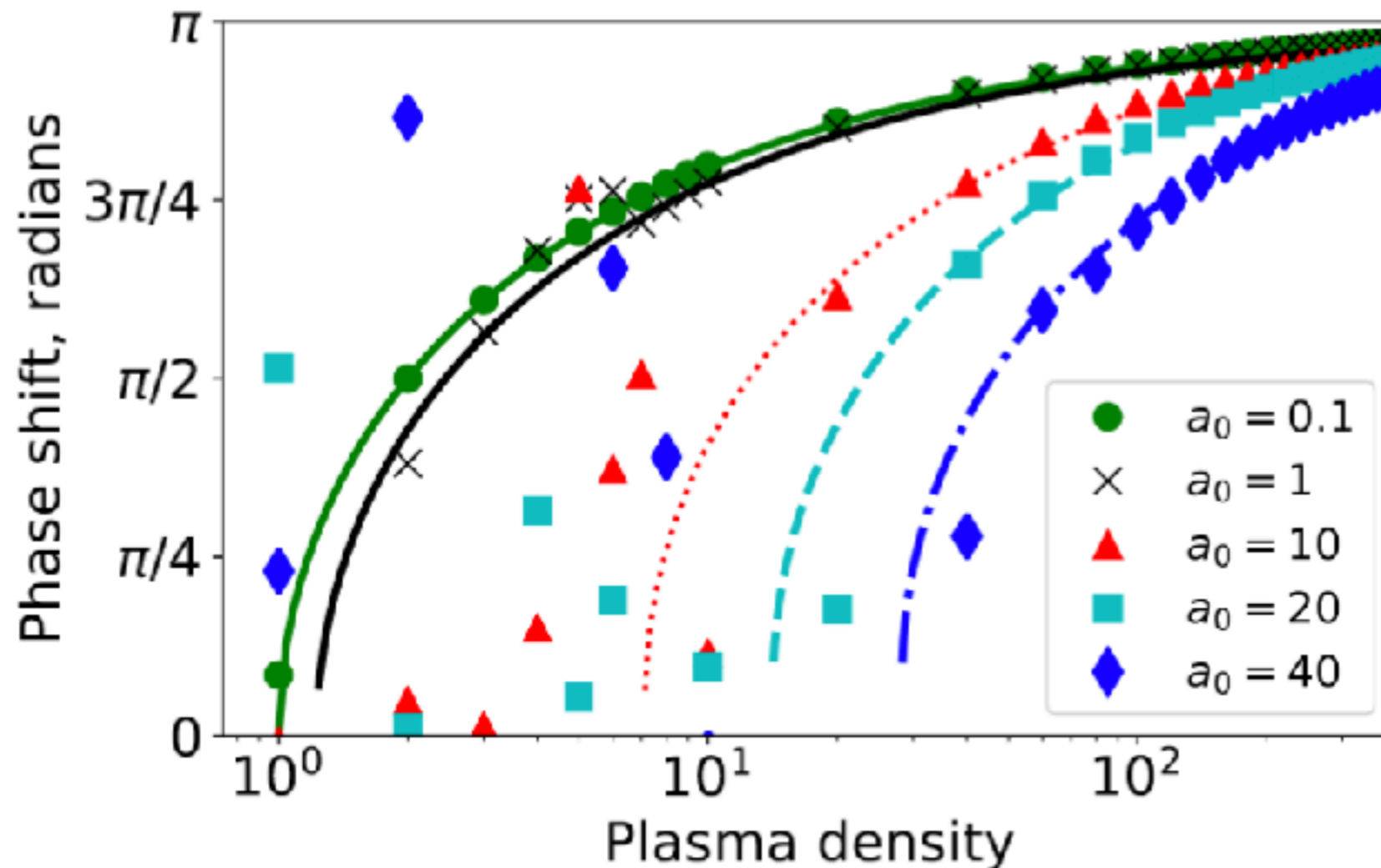
Влияние фазы несущей и параметров плазмы

Ступенька

$$\varphi_t = \varphi_0 + \arctan\left(\sqrt{\omega_p^2 - \omega_0^2}\right)$$

$$n_{0,\text{rel}} = \frac{n_0}{\sqrt{1 + \frac{a_0^2}{2}}}$$

Зависимость фазы отраженного света от плотности плазмы



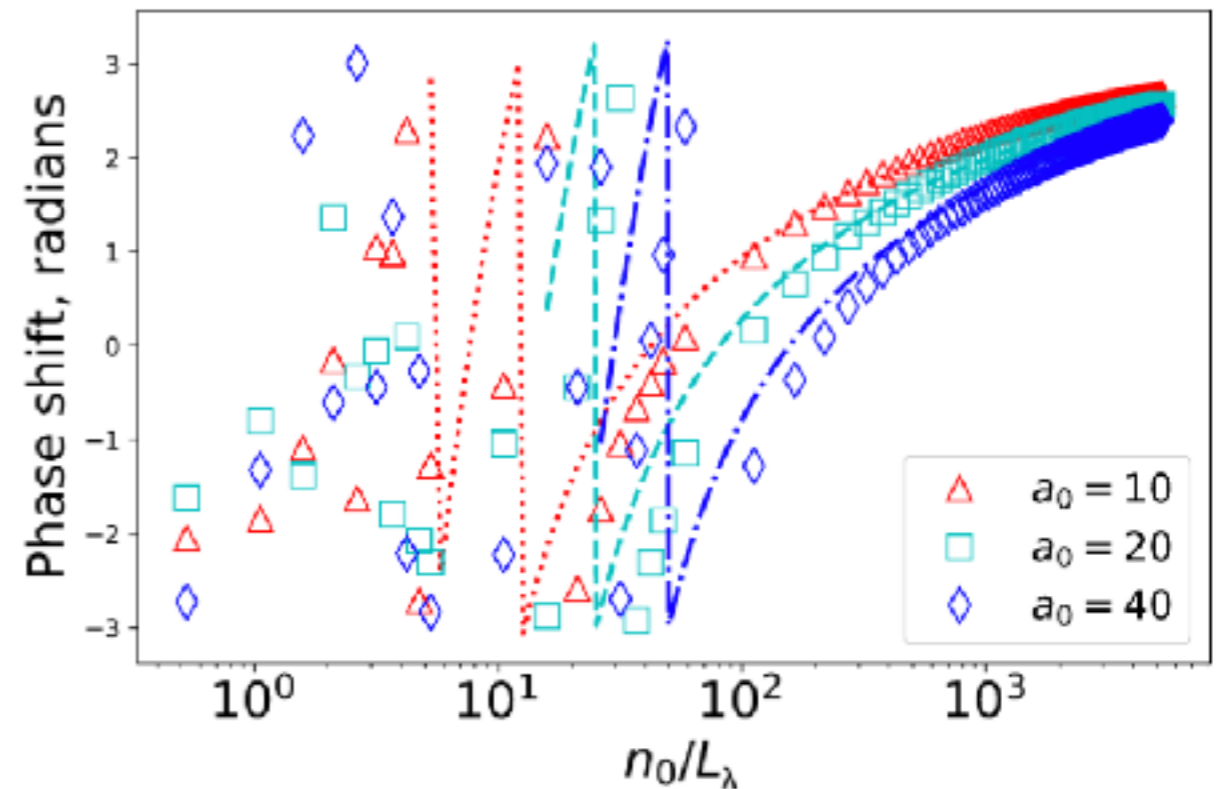
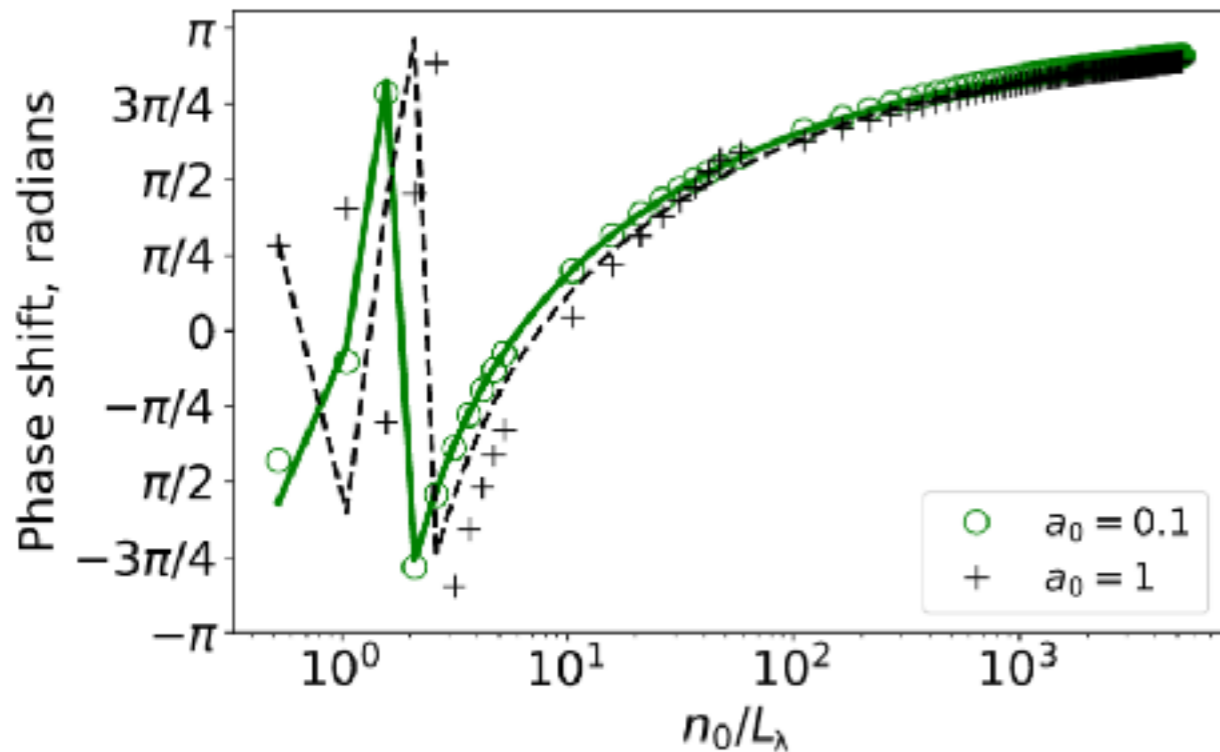
Влияние фазы несущей и параметров плазмы

Линейная преплазма

$$\varphi_t = \varphi_0 + \arctan \left(\frac{\left(\frac{n_0}{L}\right)^{1/3} \text{Ai}' \left(-\omega_0^2 \left(\frac{n_0}{L}\right)^{-2/3}\right)}{\text{Ai} \left(-\omega_0^2 \left(\frac{n_0}{L}\right)^{-2/3}\right)} \right)$$

$$n_{0,\text{rel}} = \frac{n_0}{\sqrt{1 + \frac{a_0^2}{2}}}$$

Зависимость фазы отраженного света от плотности плазмы



Влияние фазы несущей и параметров плазмы

Необходимо заботиться не только о CEP (carrier envelope phase) лазера, но и подбирать фазу правильно в соответствии с параметрами плазмы. Примеры для ступеньки;

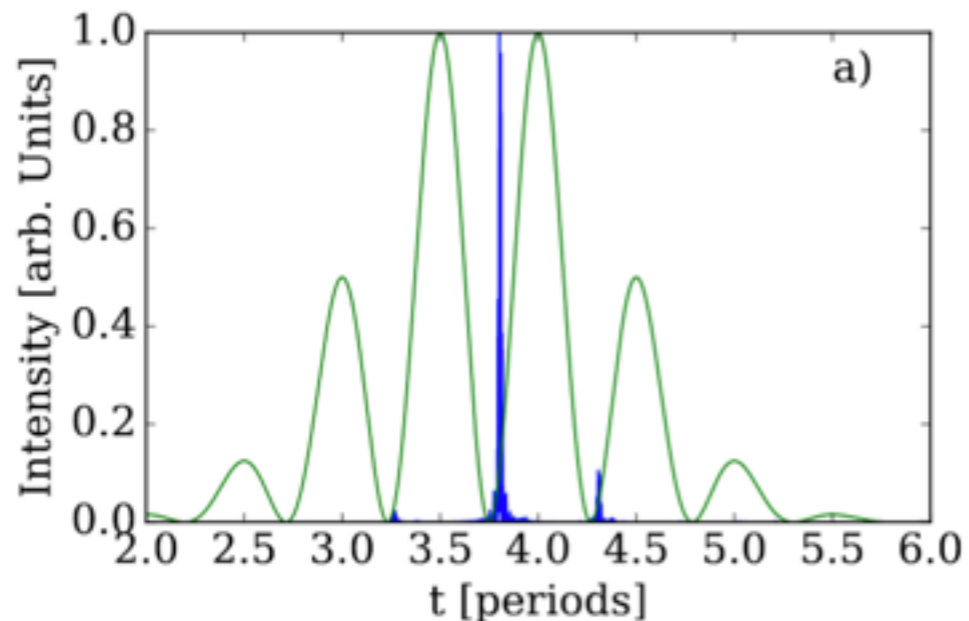
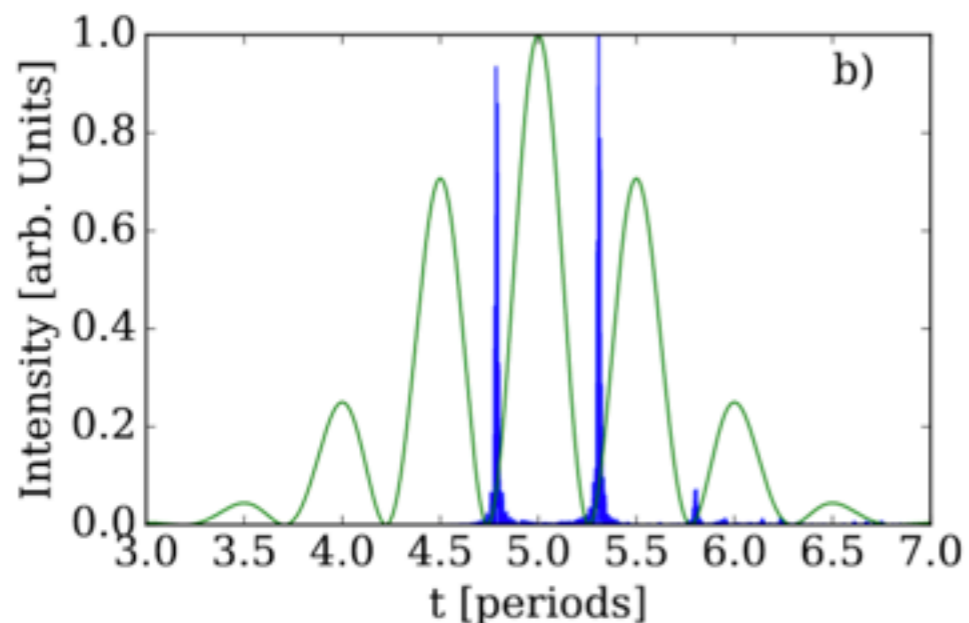


FIG. 8. Attosecond XUV pulses generated by a 3-cycle incident pulse with $a_0 = 20$ normally incident on a step-like target with $n_e = 80n_c$. The incident (green) and reflected

В отражении



Влияние фазы несущей и параметров плазмы

Необходимо заботиться не только о CEP (carrier envelope phase) лазера, но и подбирать фазу правильно в соответствии с параметрами плазмы. Примеры для ступеньки

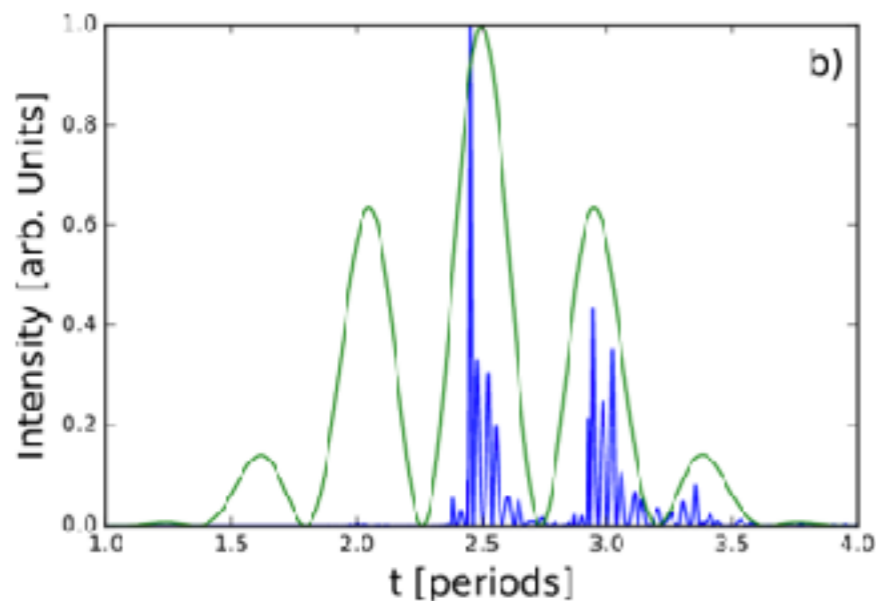
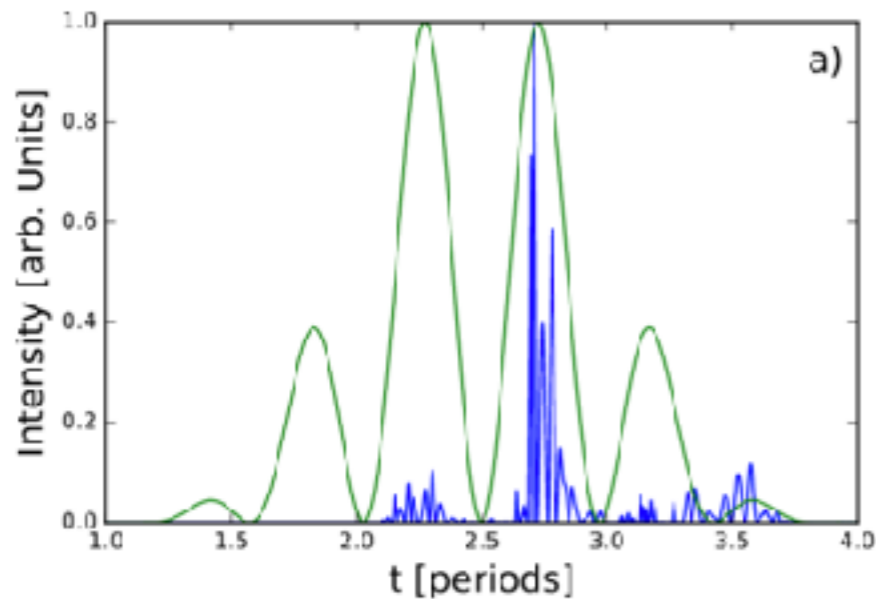
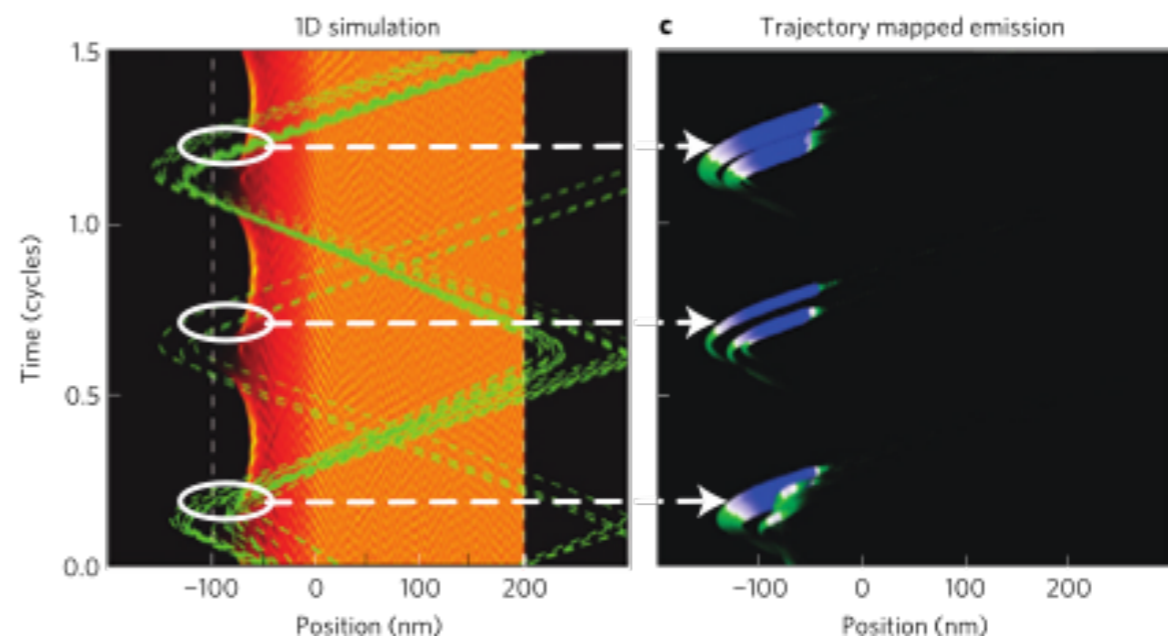


FIG. 8. Attosecond XUV pulses generated by a 3-cycle incident pulse with $a_0 = 20$ normally incident on a step-like target with $n_e = 80n_c$. The incident (green) and reflected

В прошедшем свете
(без фильтрации —
плазма сама отфильтровывает)



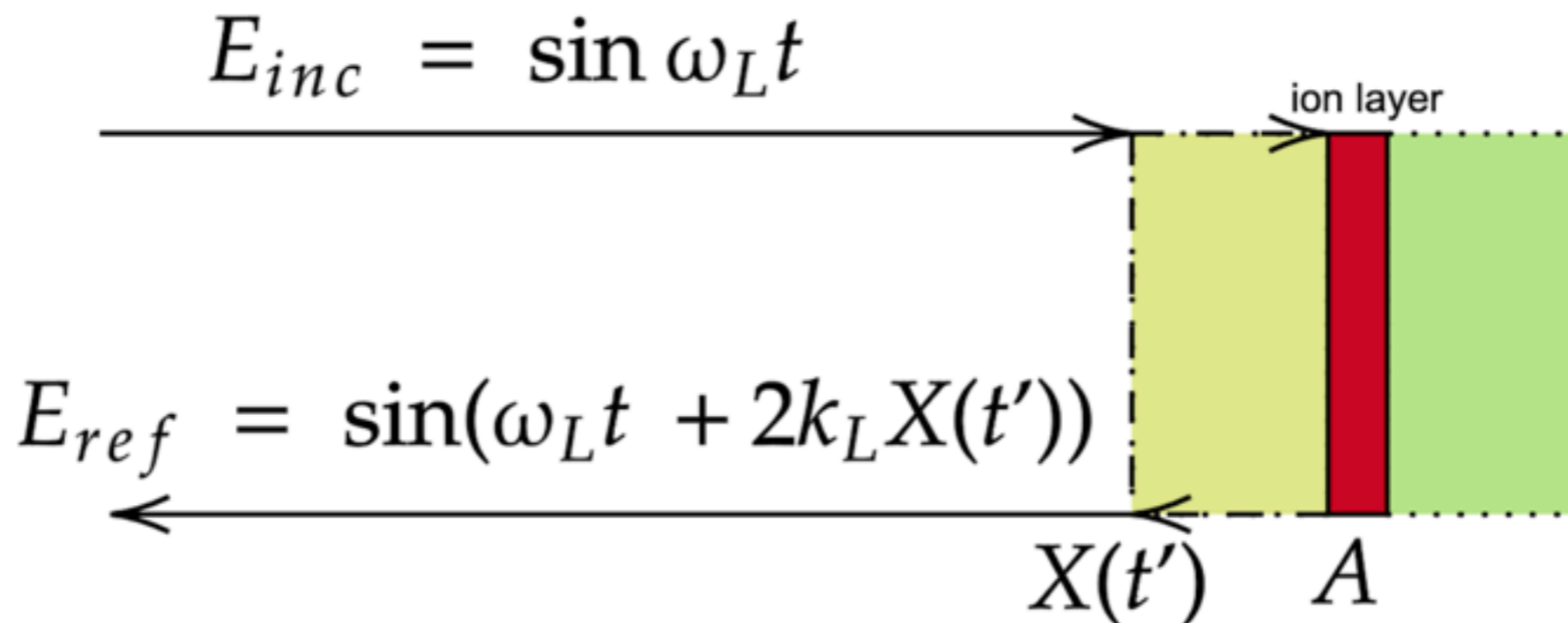
Часть 3. Довольно простая модельная постановка задачи

Эйнштейн 1905:

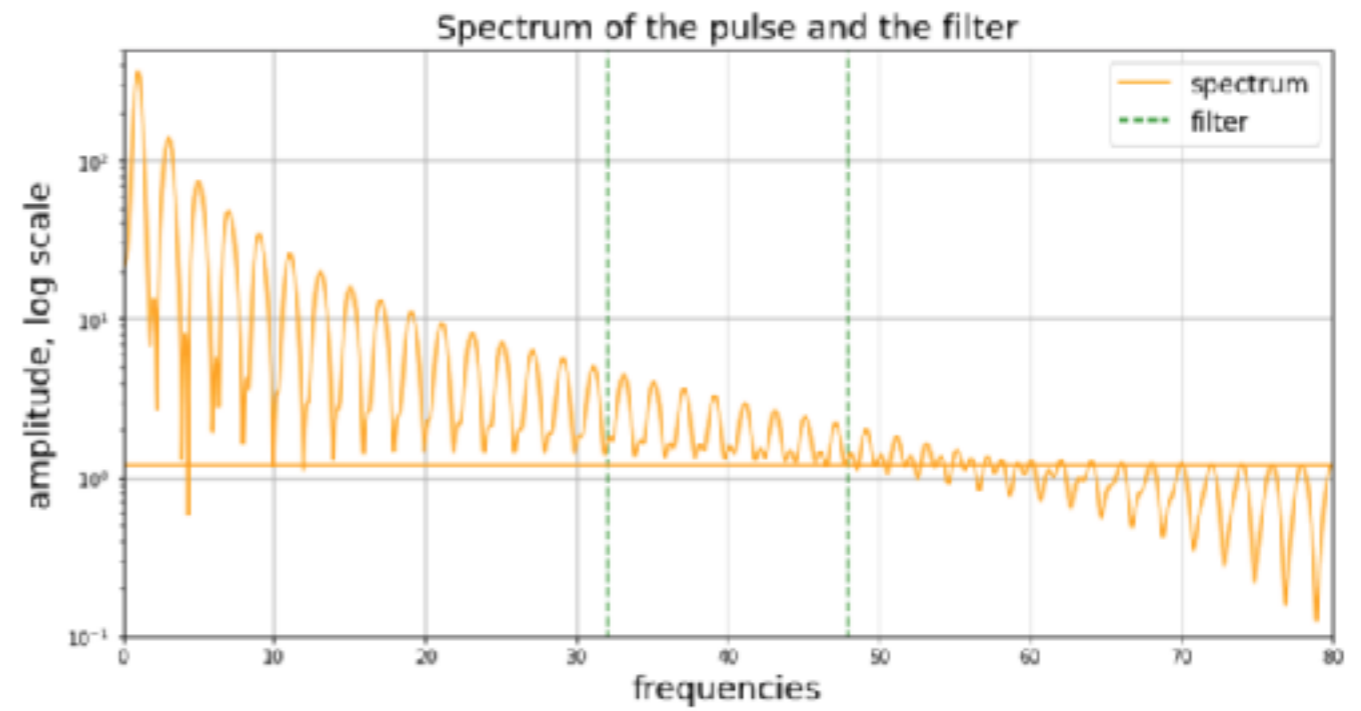
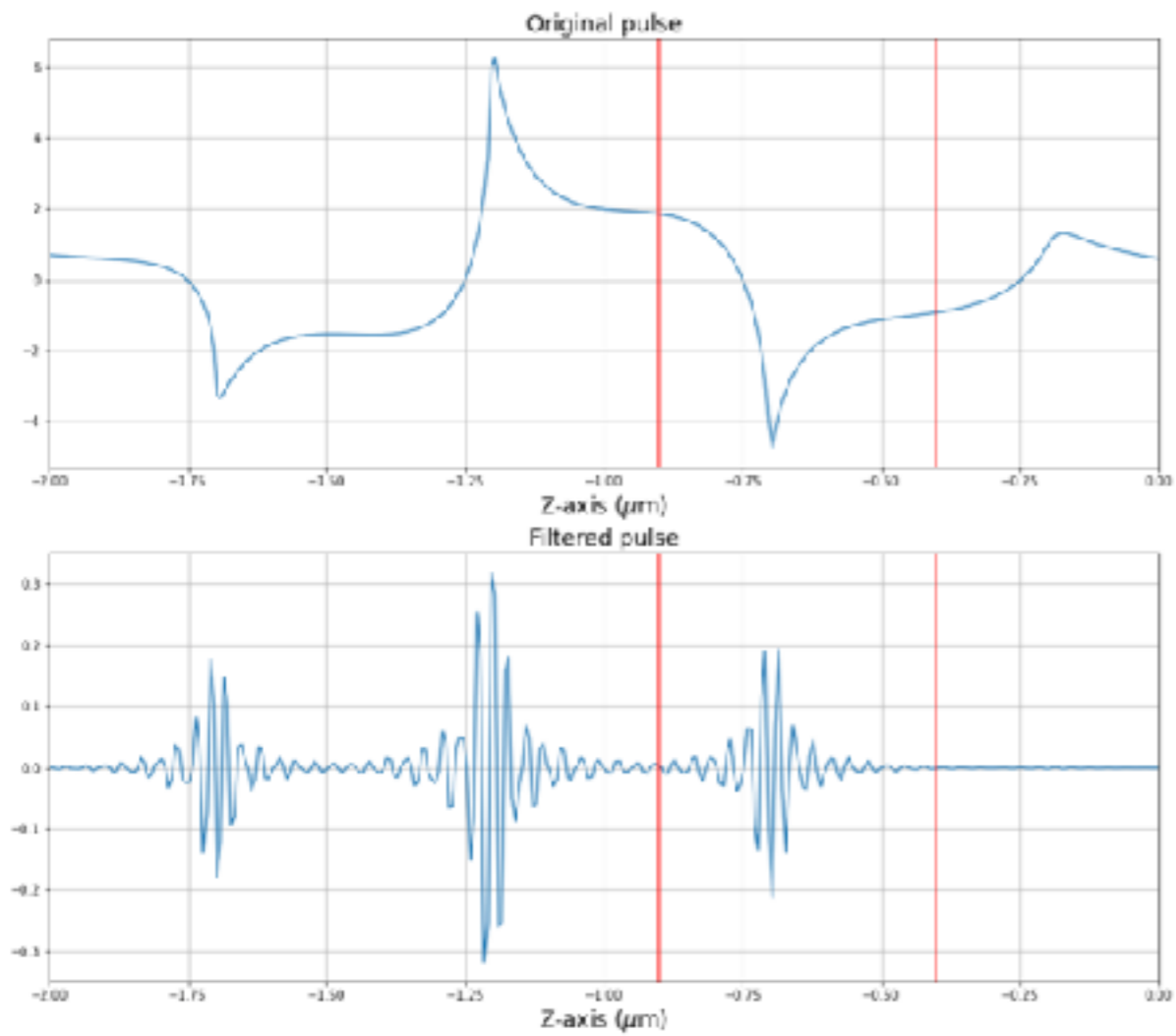
Есть идеальное зеркало, движущееся с постоянной скоростью близкой к скорости света c . Что будет при отражении?

Осциллирующее зеркало:

А что будет если зеркало осциллирует, причем скорость в пике близка к скорости света c ?



Модельные расчеты



Передача орбитального углового момента

Движение зеркала при облучении Лагерр-Гауссовым пучком с ОУМ

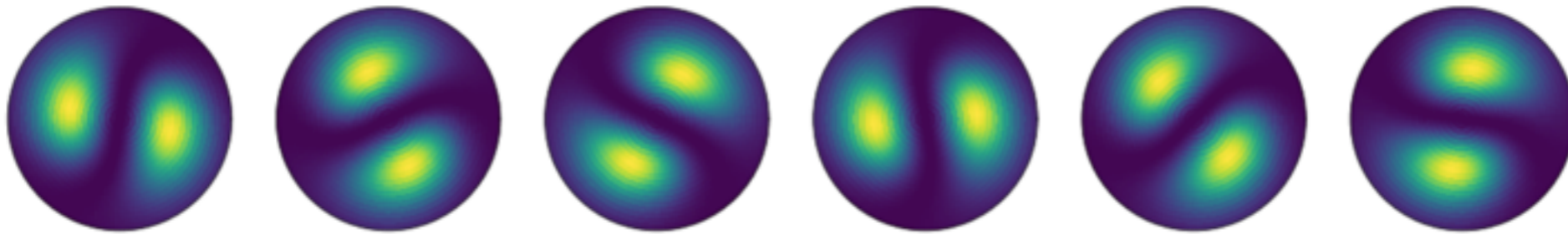
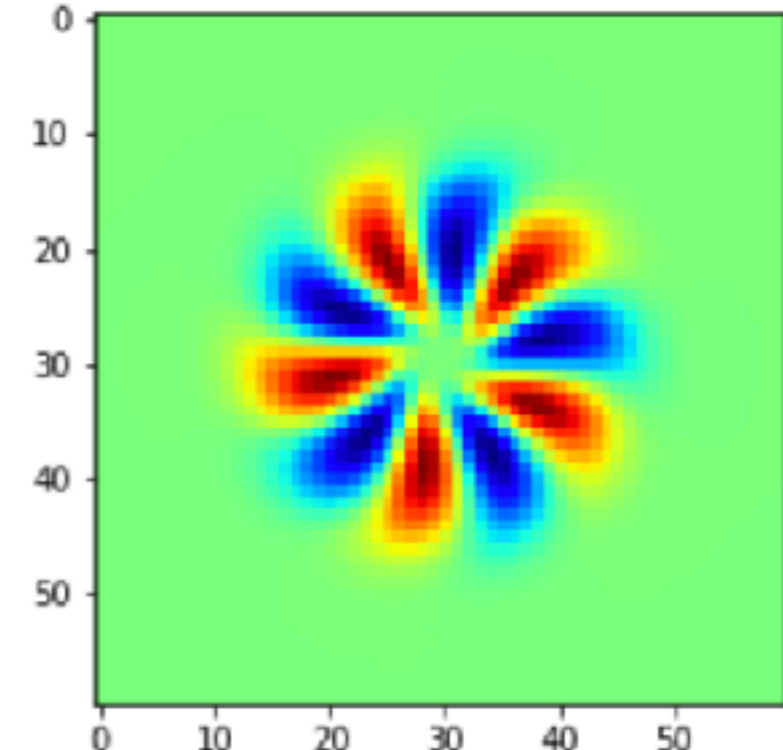
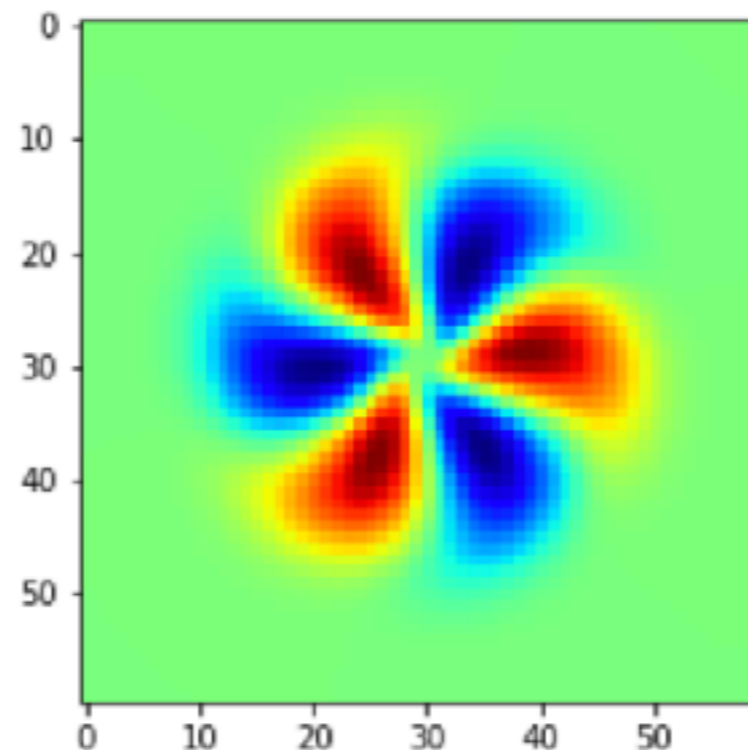
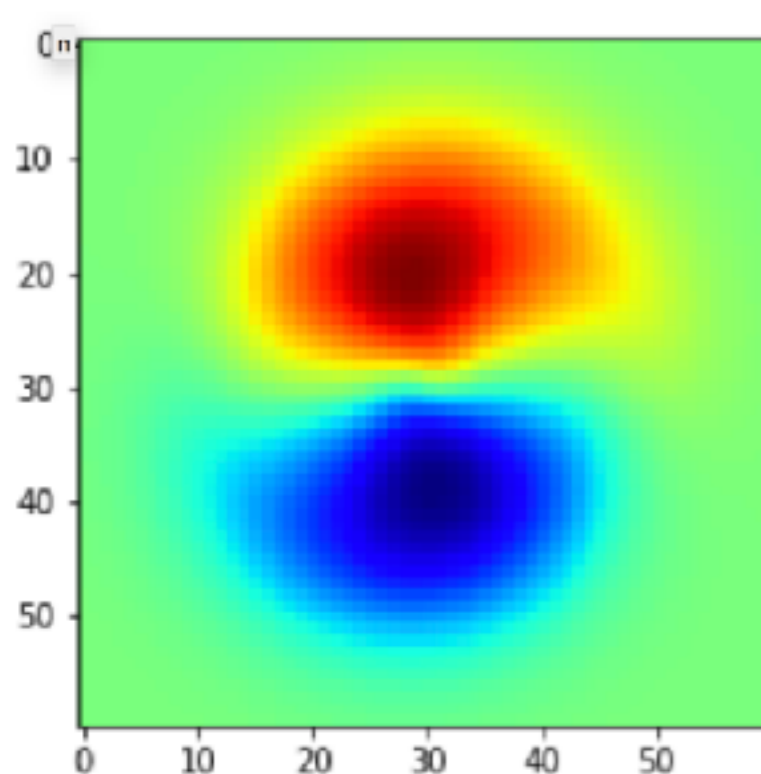


Figure 4.2: Evolution of the target motion after interaction with the incident LG beam pulse

Fundamental (1st)

3rd harmonic

5rd harmonic



Заключение

- Представлена простейшая осцилляторная модель для динамики поверхности твердотельной плазмы
- Показано наличие сдвига фазы зависящего от параметров плазмы
- Показано влияние фазы несущей и параметров плазмы на генерацию одиночных аттосекундных импульсов
- В процессе: применение нелинейной гидродинамической модели движения поверхности (with Arnaud Debayle) — получены похожие результаты

Self-consistent theory of high-order harmonic generation by relativistic plasma mirror

A. Debayle, J. Sanz, and L. Gremillet
Phys. Rev. E **92**, 053108 – Published 17 November 2015

- Исследование 3хмерных задач — генерация импульсов с ОАМ

