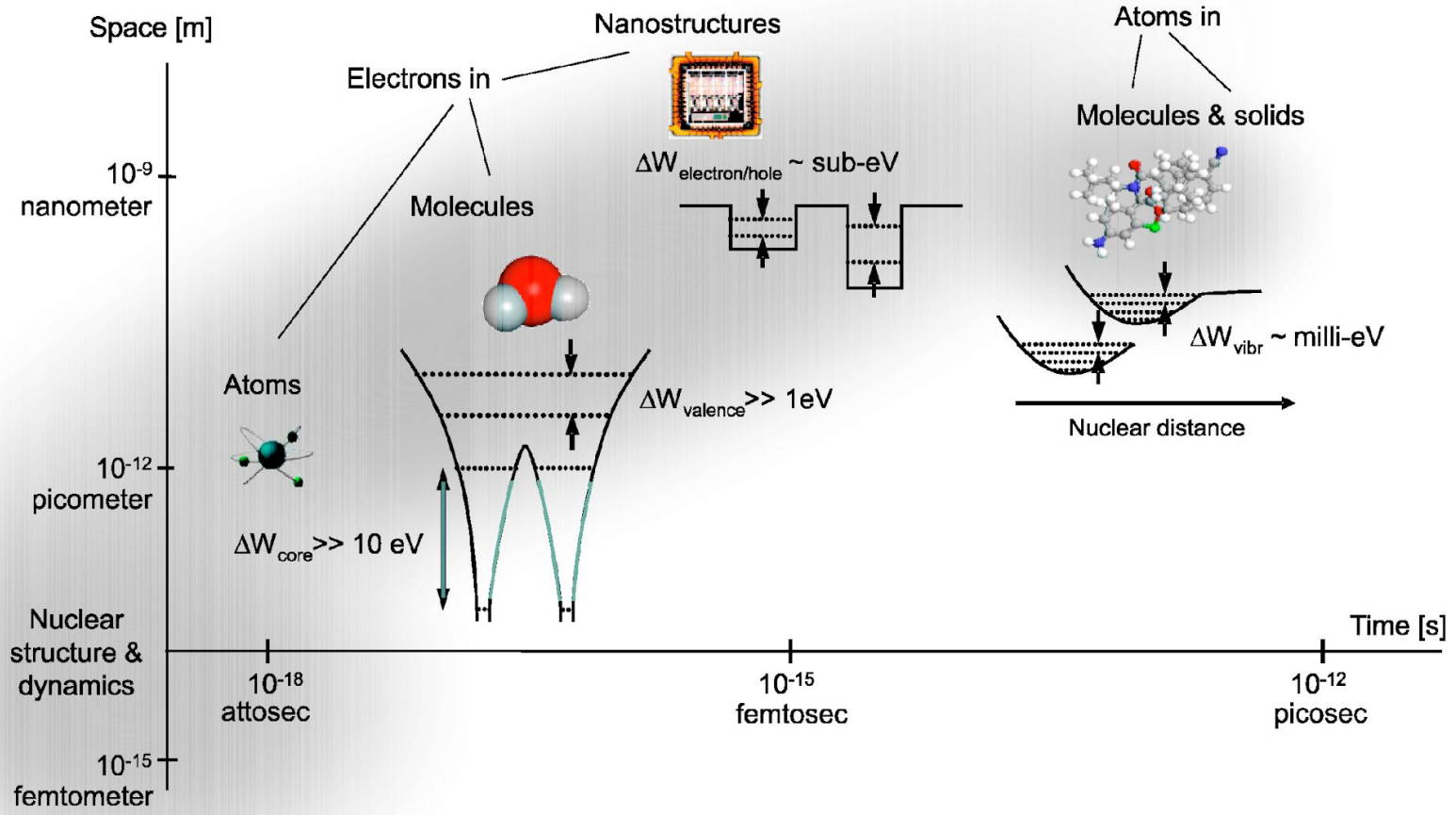


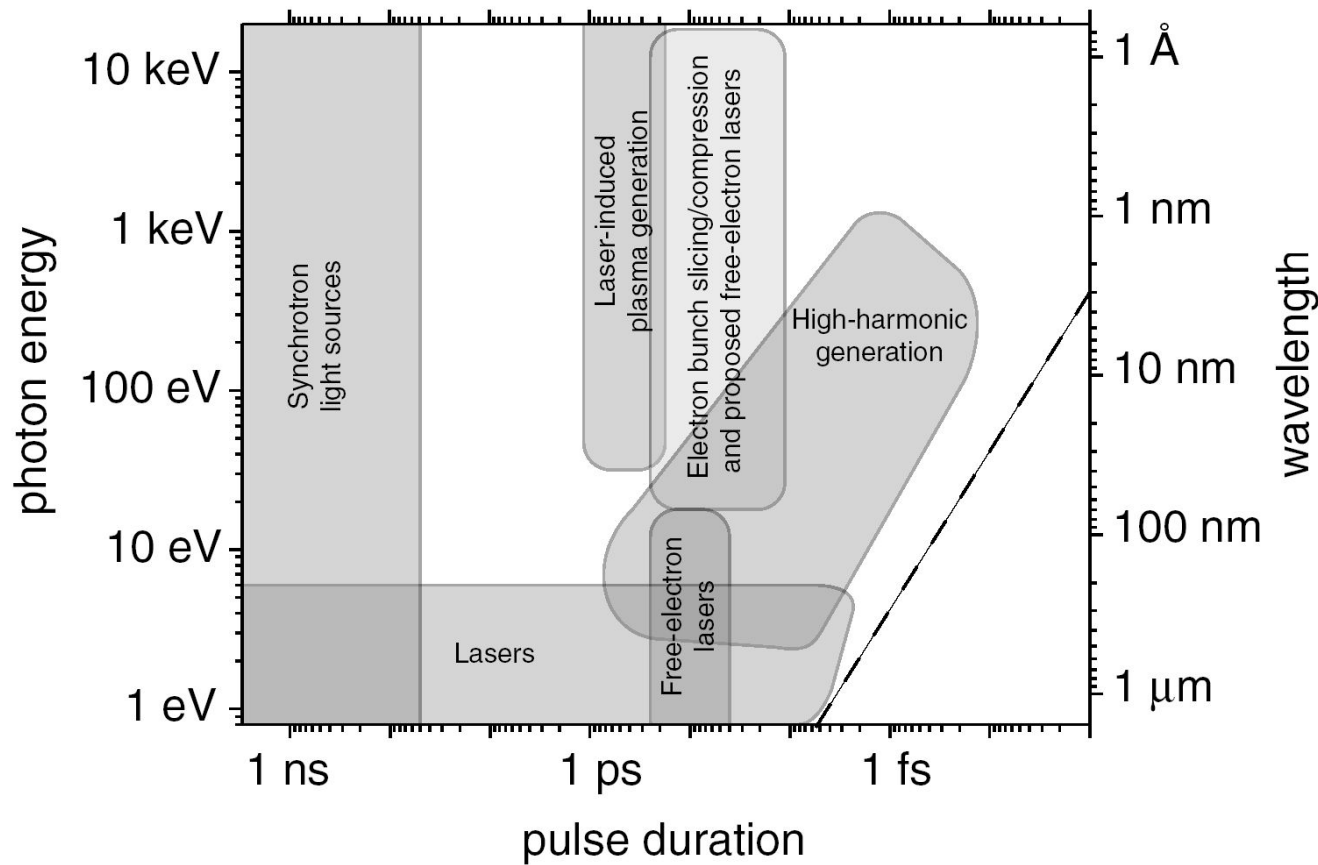
**ГЕНЕРАЦИЯ АТТОСЕКУНДНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХИНТЕНСИВНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

В.В.Стрелков

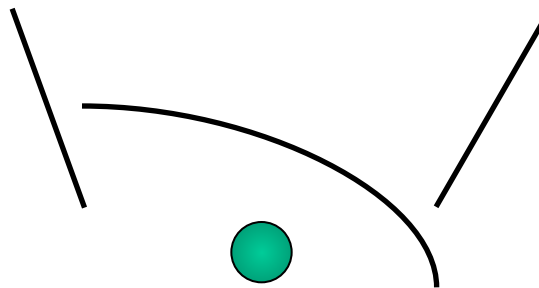
Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН
Москва



Пространственные и временные масштабы, характерные для различных микроскопических объектов

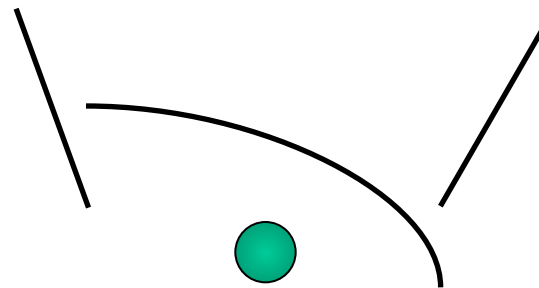


Области длин волн и длительностей импульса, покрываемые различными источниками когерентного электромагнитного излучения. Пунктирная кривая – предельно-короткий импульс (длительность импульса равна периоду поля). Видно, что в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне приблизиться к этому пределу позволяют источники, основанные на генерации гармоник высокого порядка.



$$F \sim \sin(\omega t) \longleftrightarrow$$

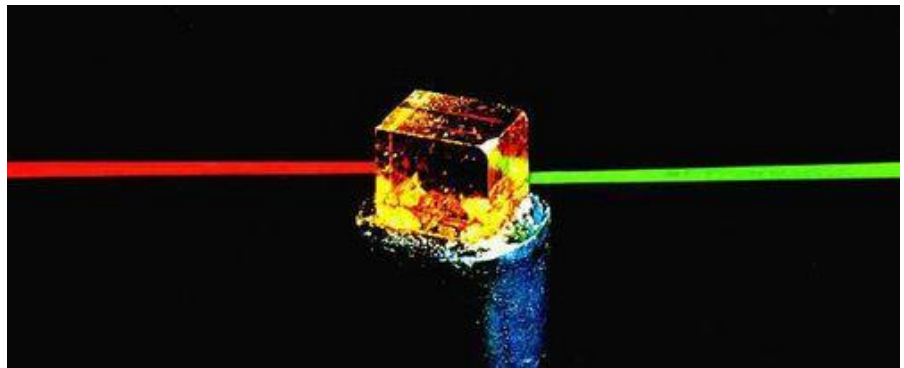
$$x \sim \sin(\omega t) \longleftrightarrow$$



$$\longleftrightarrow F \sim \sin(\omega t)$$

$$\longleftrightarrow x \sim \sin(\omega t) + \alpha_2 \sin(2\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \dots$$

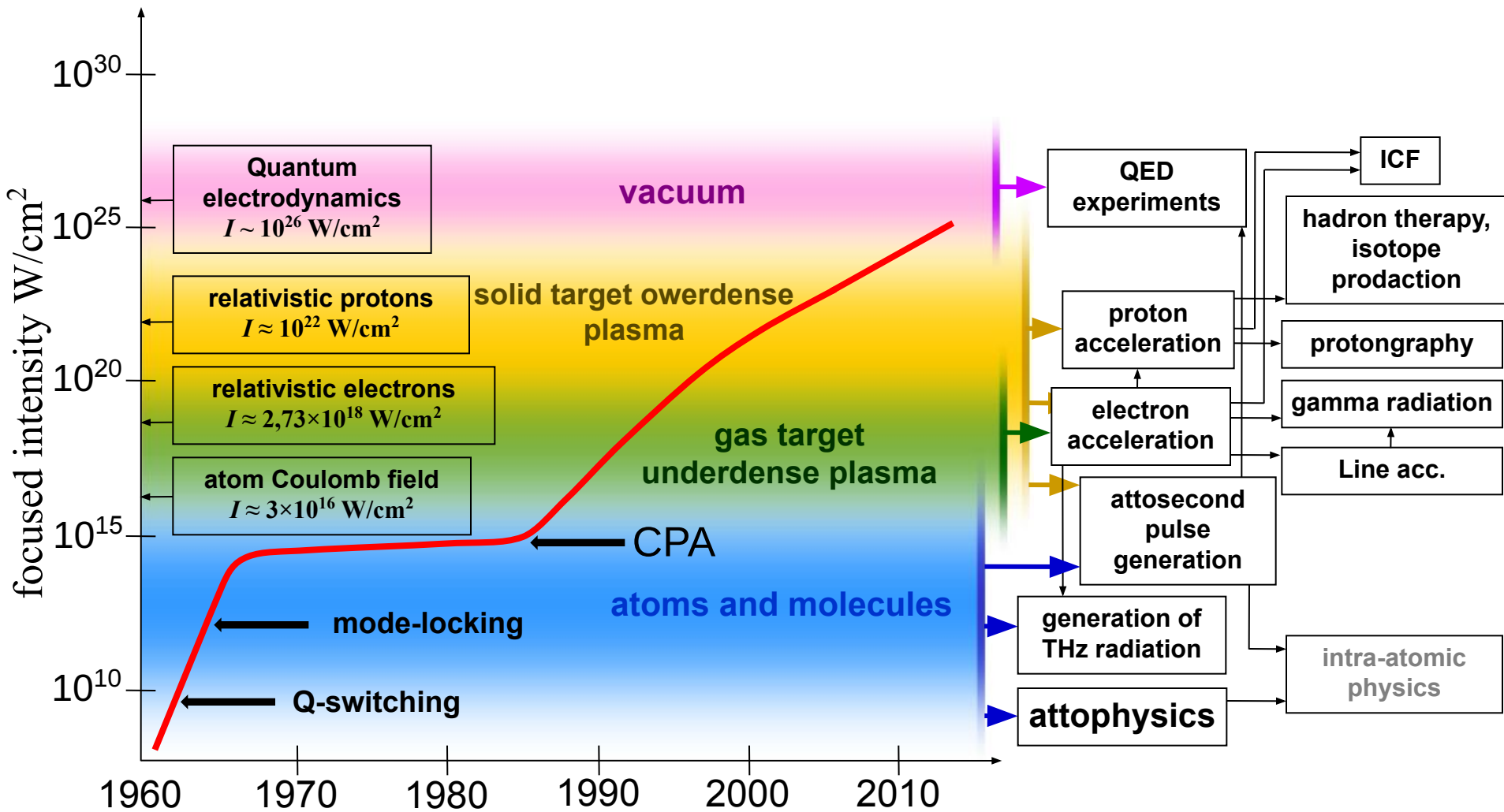
пока $F \ll F_{\text{связ}}$ генерация гармоник описывается теорией возмущений,
 поэтому $\alpha_n \sim (F/F_{\text{связ}})^n$ \longrightarrow генерация **НИЗКИХ** гармоник



Удвоение частоты света в кристалле ниобата натрия $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$. Зелёный цвет — натуральный цвет излучения второй гармоник; невидимое глазом инфракрасное излучение неодимового лазера регистрируется на специально сенсibilизированной цветной пленке как красное.

когда $F \sim F_{\text{связ}}$ возможна генерация **ВЫСОКИХ** гармоник

$$\text{В оптике } F_{\text{связ}} = F_{\text{атомн}} \sim e^2/r_{\text{Bohr}}^2$$



Прогресс в повышении пиковой интенсивности лазерных источников

План:

Генерация высоких гармоник при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с газами. Современные достижения в области получения аттосекундных импульсов.

Резонансная генерация высоких гармоник: путь повышения эффективности генерации.

Генерация когерентного ультрафиолетового и рентгеновского излучения при взаимодействии сверхинтенсивного лазерного излучения с поверхностью

лазерный импульс

интенсивность:
 $10^{14} - 10^{15} \text{ Вт/см}^2$

длительность:

1 пс – 5 фс

параметр Келдыша: $\gamma < 1$

$$\gamma = \sqrt{\frac{I}{2U}} \quad U = \frac{e^2 E^2}{4m\omega^2}$$

пондеромоторная
энергия

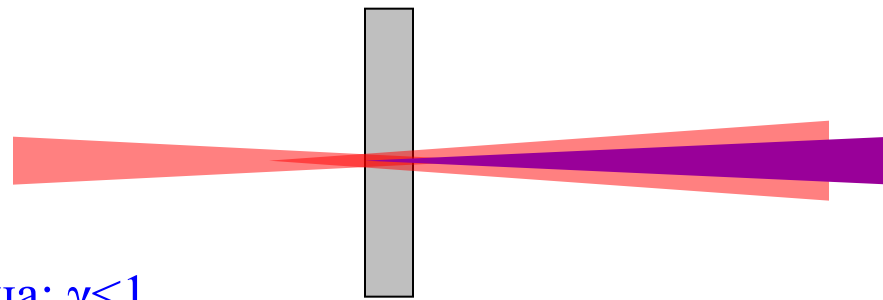
Experiment:

Ar,

Ti:Sapp laser

800 nm,

$2 \cdot 10^{14} \text{ Вт/см}^2$



газообразная
мишень

гармоники

номера: до ~ 5000

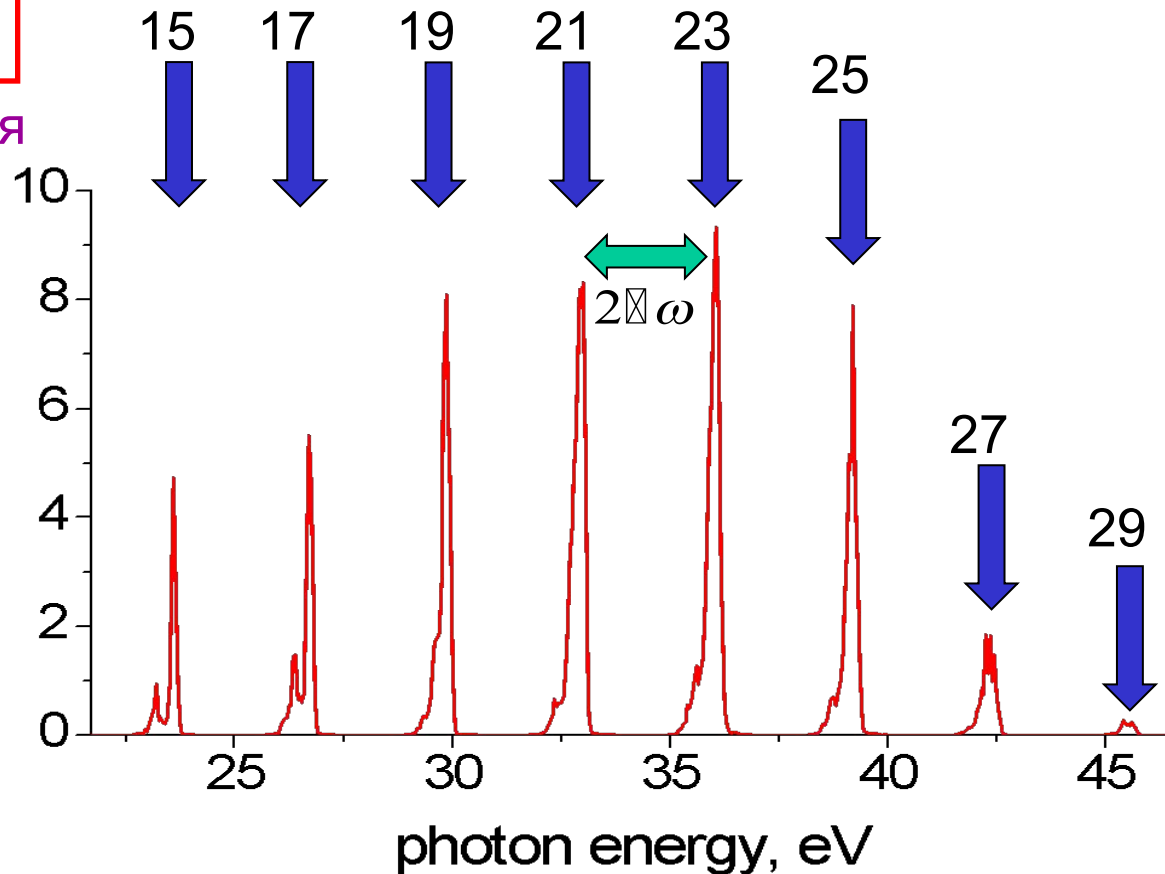
длина волны: до 0.3 нм

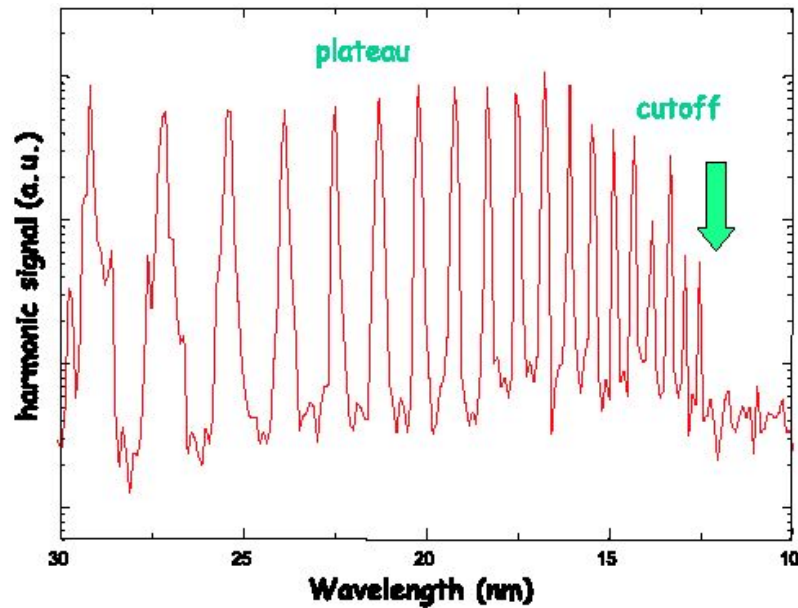
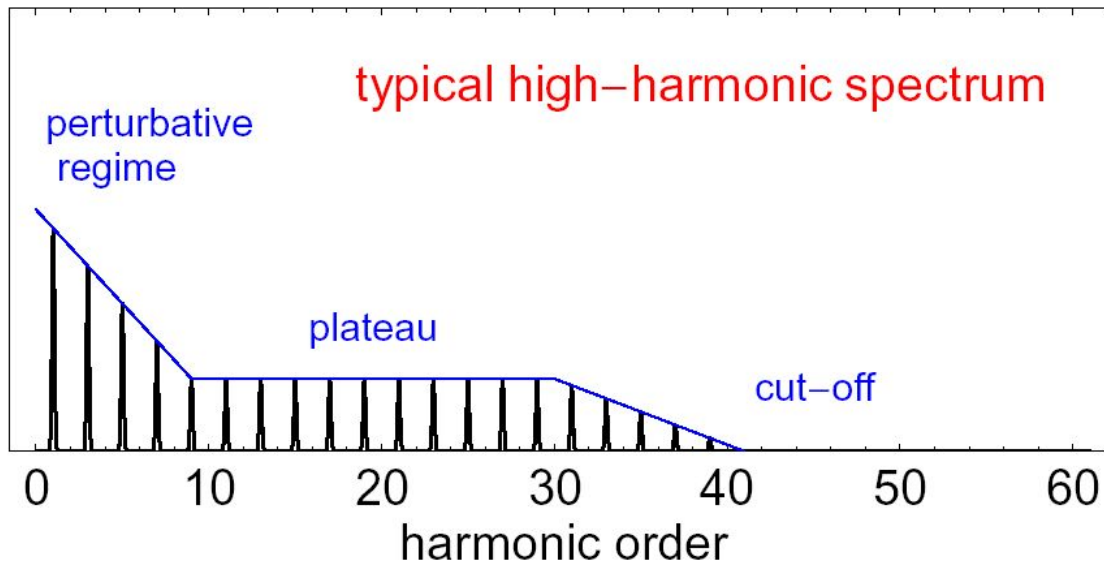
эффективность

преобразования:

менее 10^{-4}

harmonic signal, arb. un.

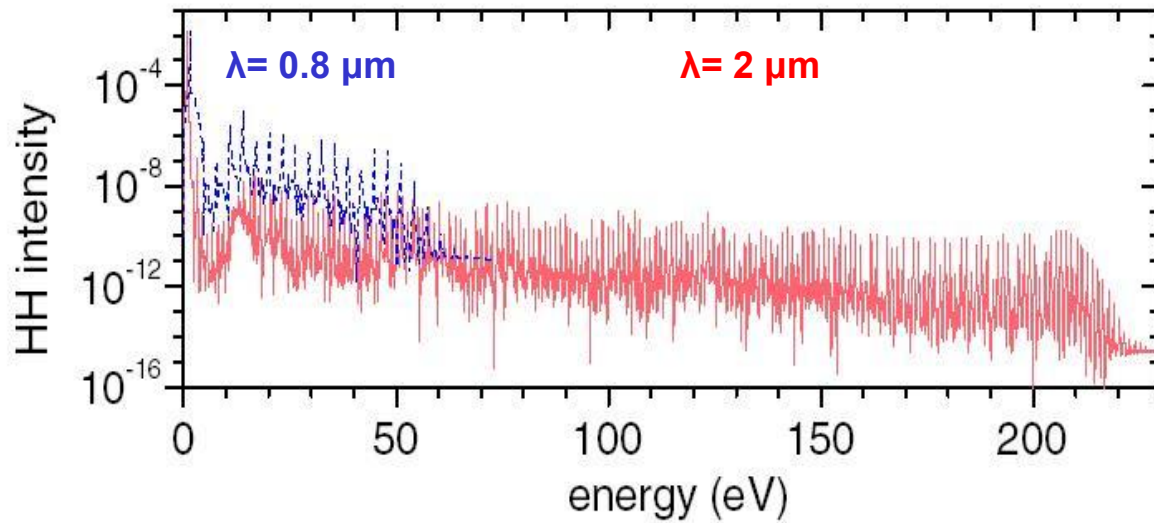




**Высокочастотная граница
плато**

$$N_{\max} \approx \frac{I + 3U}{\hbar \omega}$$

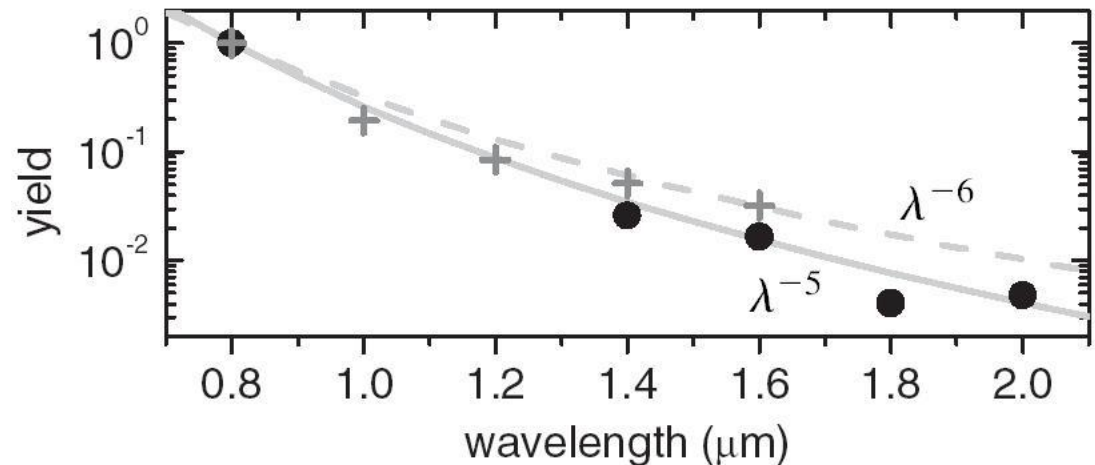
$$U = \frac{e^2 E^2}{4m\omega^2}$$

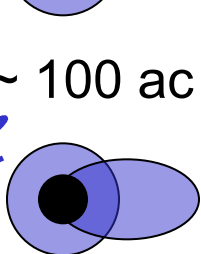
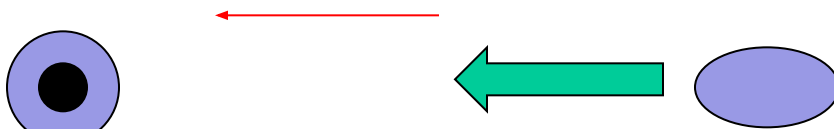
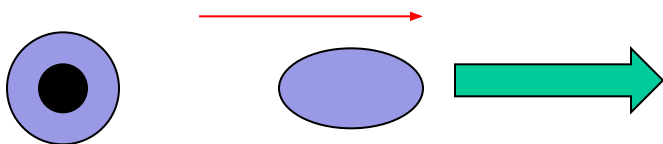
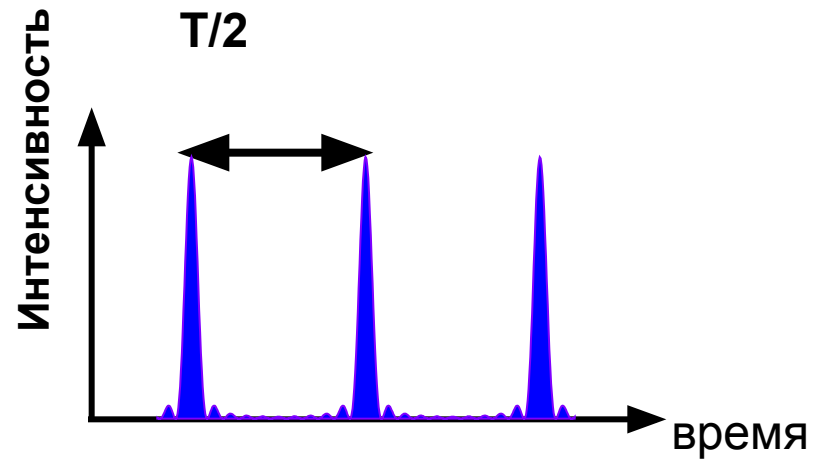
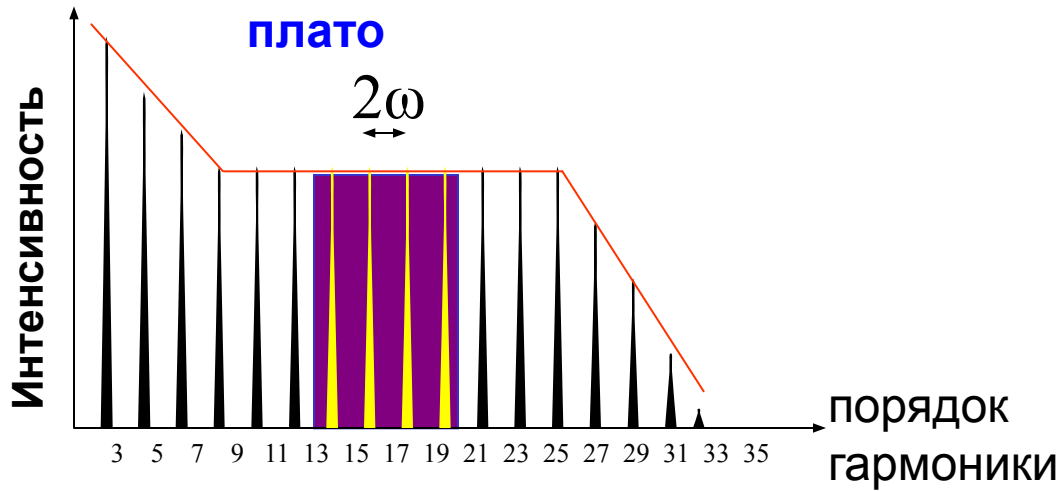


$$N_{\max} \approx \frac{I + 3U}{\hbar \omega}$$

$$U_p \propto I \lambda^2$$

**J. Tate, T. Augustine, H.G. Muller,
P. Salieres, P. Agostini, and L.F.
DiMauro “Scaling of
wave-packet dynamics in an
intense midinfrared field”, PRL
98, 013901 (2007)**





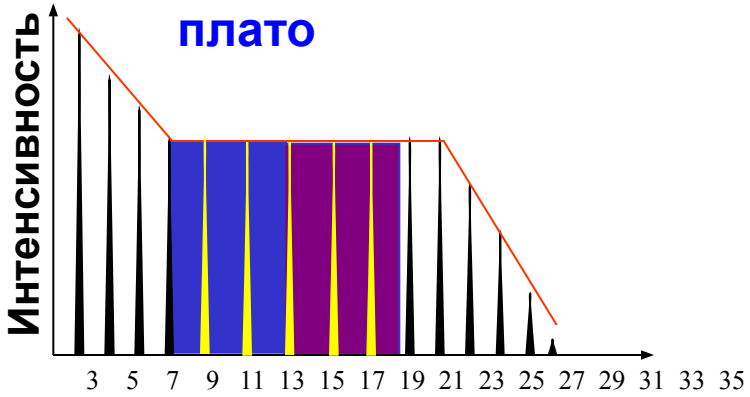
1. ИОНИЗАЦИЯ

2. ДВИЖЕНИЕ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛЯ

3. ГЕНЕРАЦИЯ
КОРОТКОВОЛНОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ

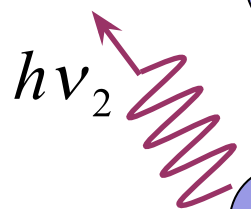
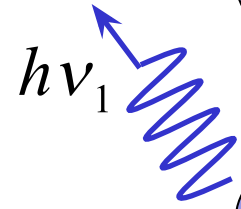
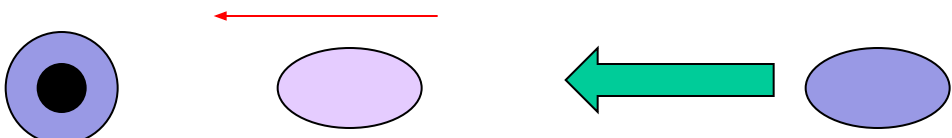
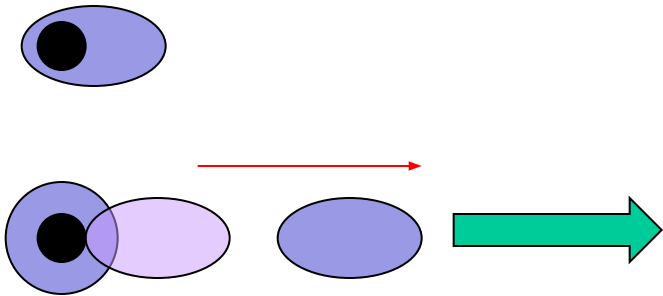
Кучиев М. Ю., Письма в ЖЭТФ, 1987

P.Corkum, *PRL*, 1993

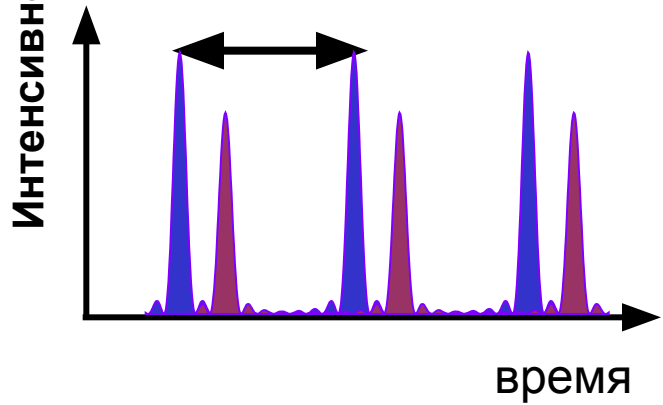


порядок
гармоники

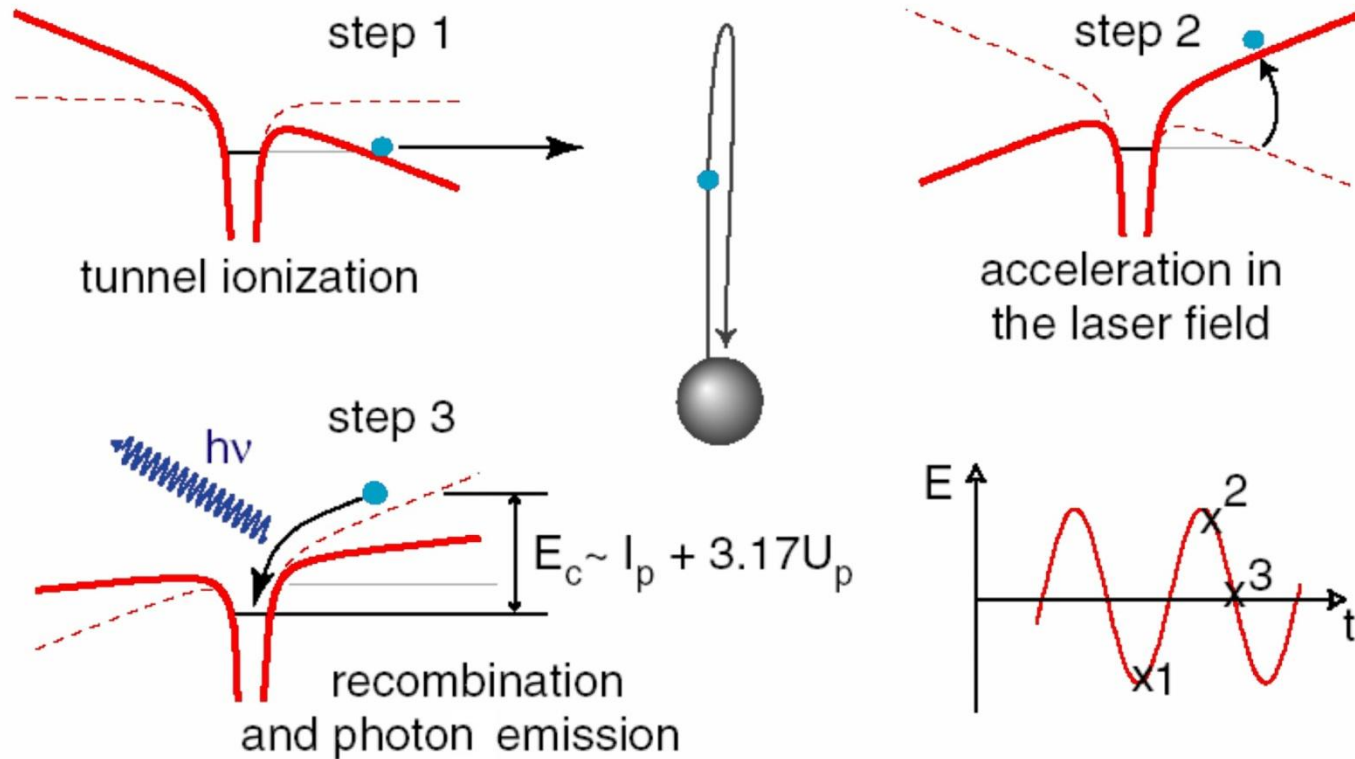
E



$T/2$

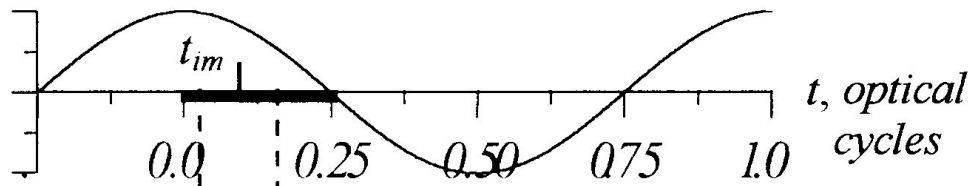


Трехступенчатый механизм

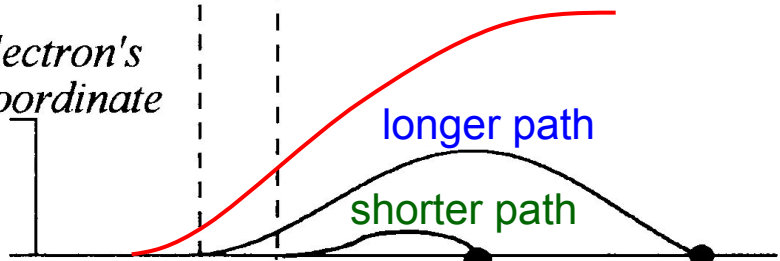


P.B. Corkum "Plasma perspective on strong-field multiphoton ionization",
PRL 71, 1994 (1993)

Electric field



electron's coordinate

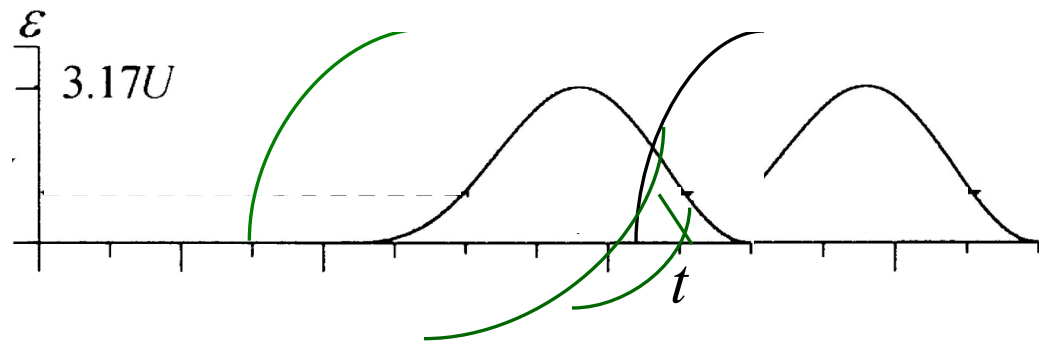
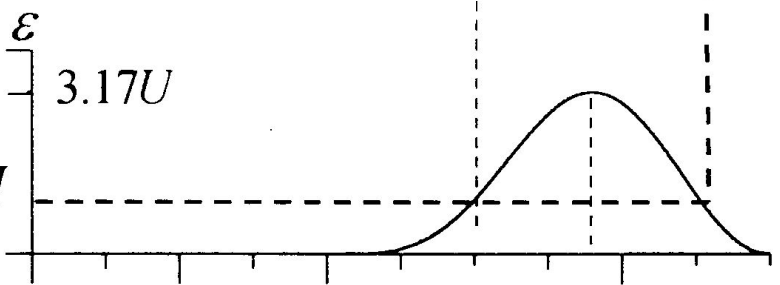


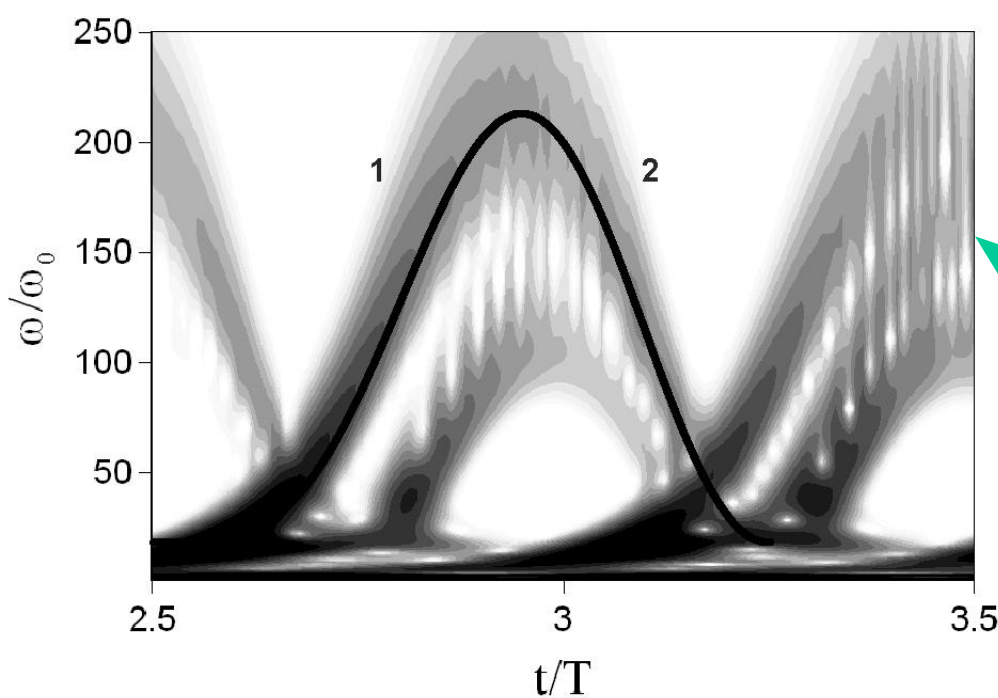
$$U = \frac{e^2 E^2}{4m\omega^2}$$

\mathcal{E}

$3.17U$

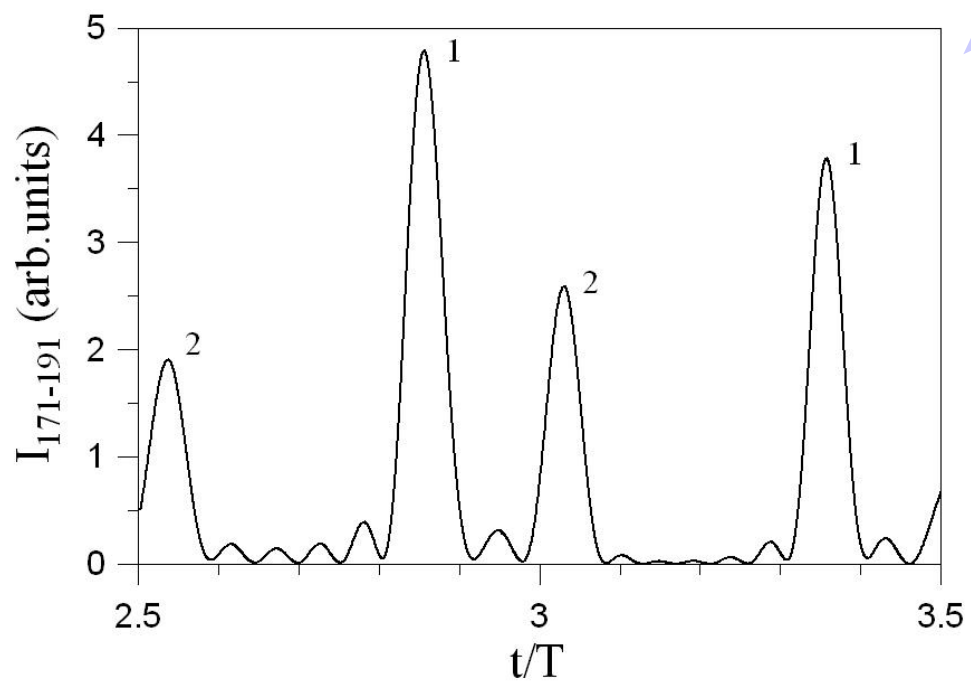
$n\hbar\omega - I$



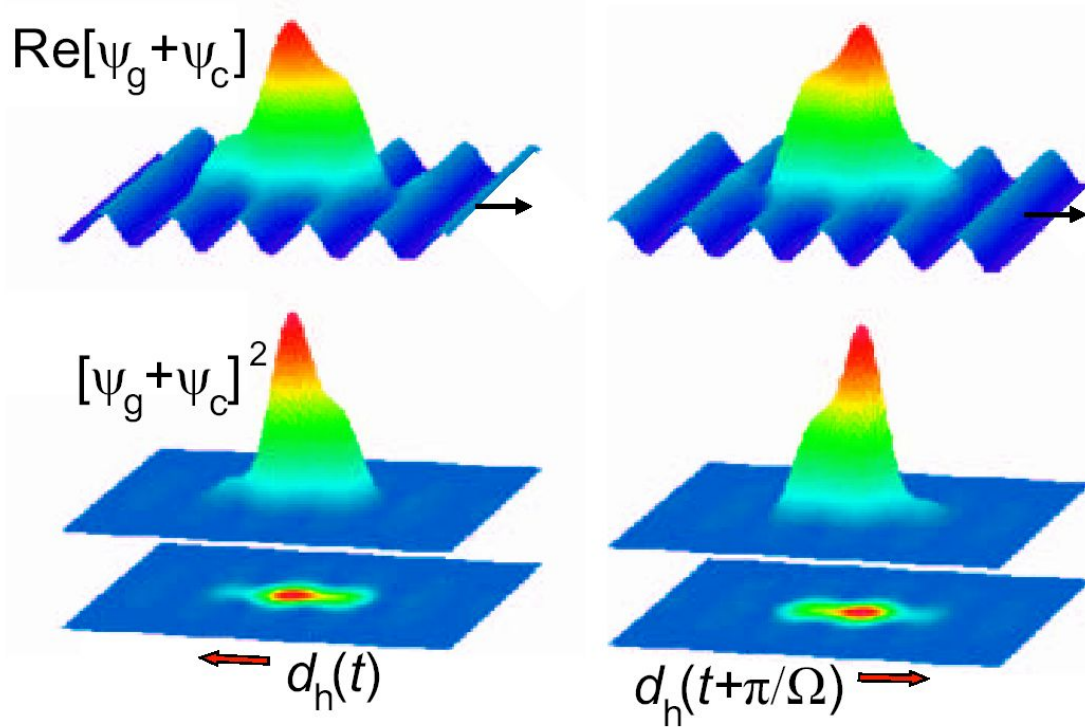


Вейвлет-преобразование сигнала гармоник, рассчитанного численно. Сплошной кривой представлена зависимость $[E_{kin}(t) + I_p] / \omega$, полученная анализа классических траекторий электрона.

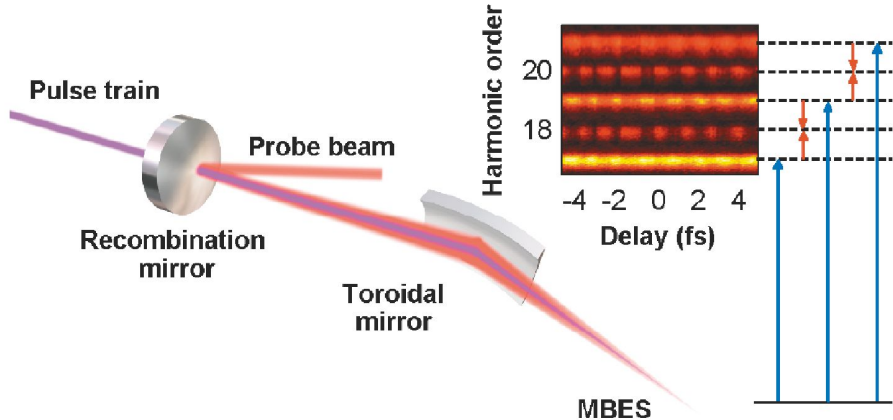
Временной профиль сигнала гармоник в частотном окне от 171-й до 191-й гармоники



квантовомеханические теории:
 M.Levenstein et. al., 1994
 W.Becker et. al., 1994
 В.Т.Платоненко, 2000
 V.Strelkov, 2006



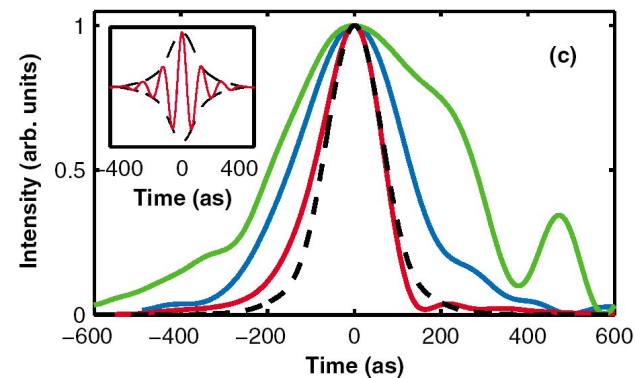
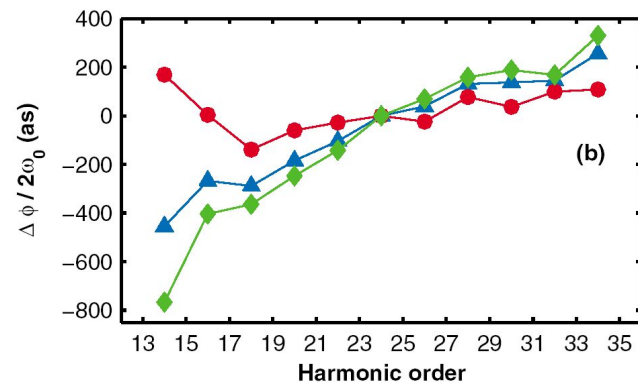
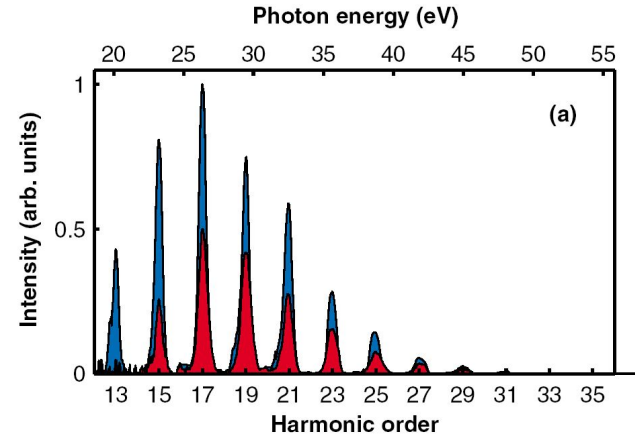
Interference of recolliding wave packet with the ground state part of the same electron wave function, at two adjacent moments of time (left and right set of panels). Top and bottom panels show real part of the total wave function and the electron density, respectively. Interference leads to oscillations of electron density and hence of the induced dipole moment.



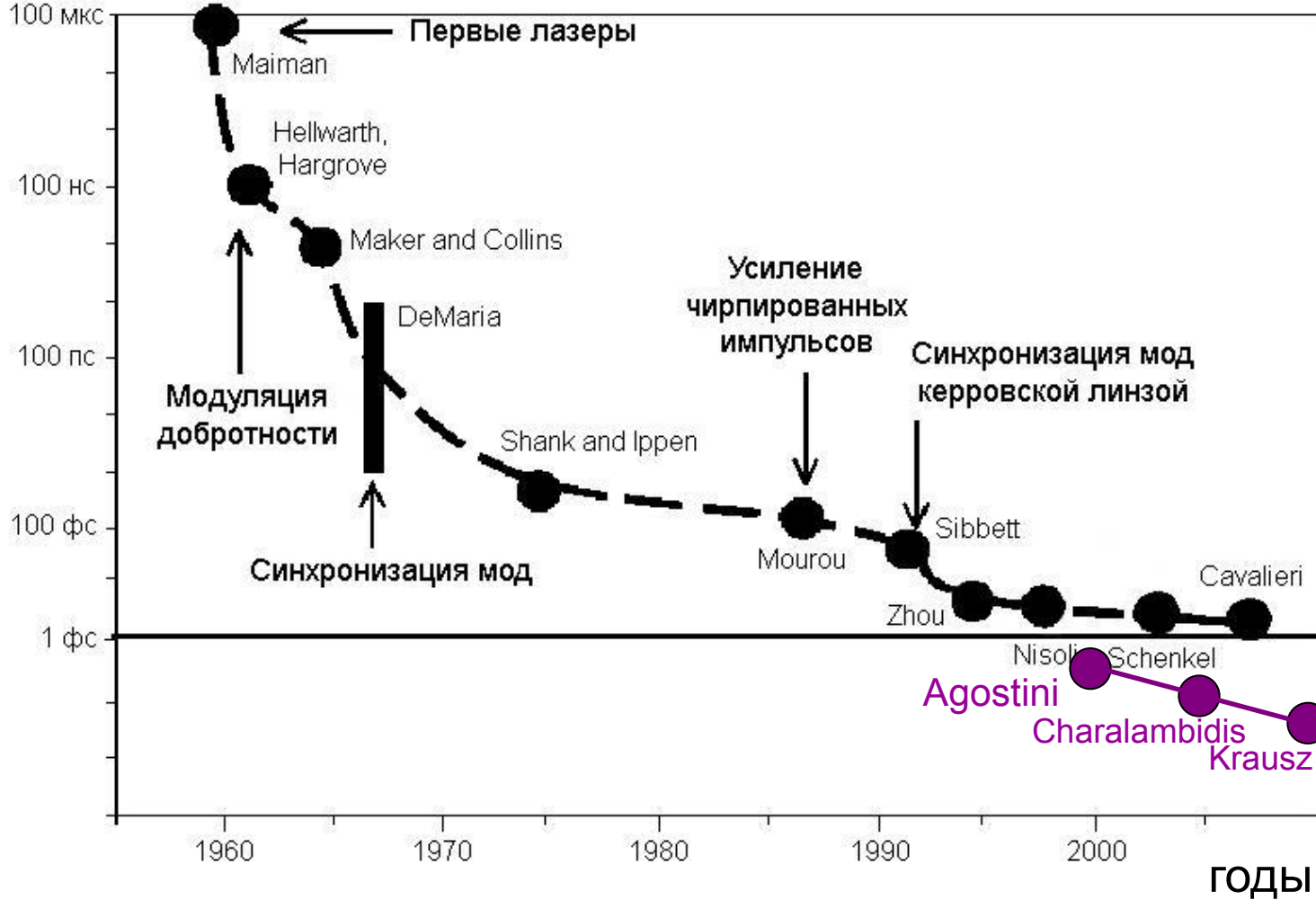
Attosecond pulse characterization. The measurement, known as RABITT, is based on the two-color two-photon ionization process pictured on the right. A typical acquisition with harmonic and sideband signals (in false colors) is shown as a function of the delay.

Экспериментальные результаты по измерению длительности аттосекундного импульса.

Длительность импульса 170 ас, что составляет лишь 1.2 периода несущей частоты (ультрафиолетового излучения)



R. Lopez-Martens, PRL, 2005

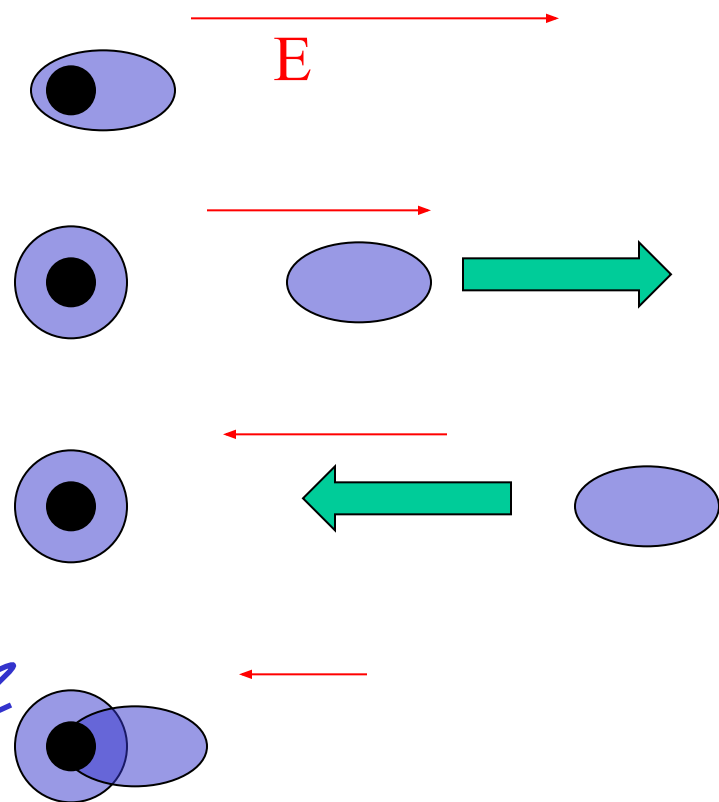


генерация
высоких
гармоник:
80 ас

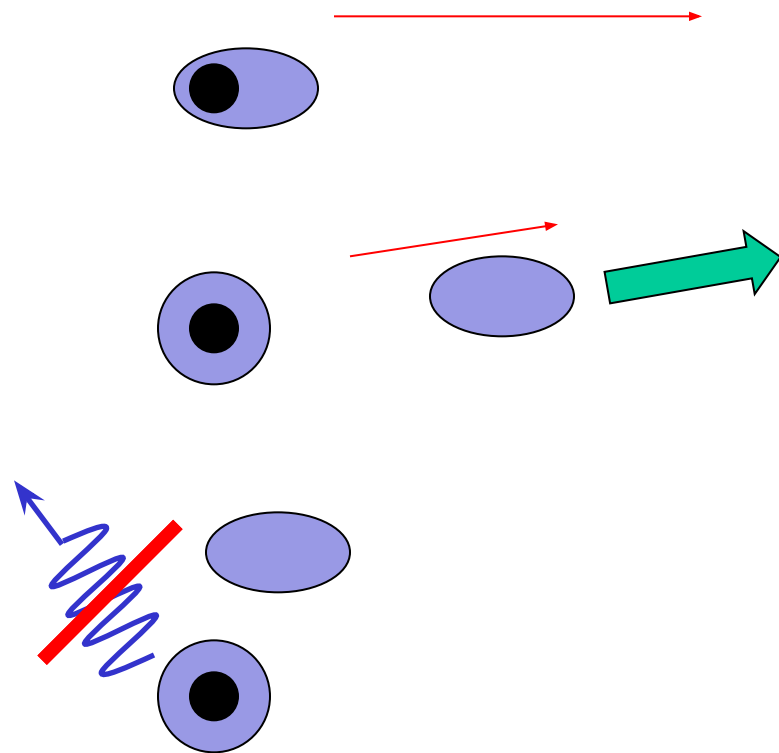
Прогресс в уменьшении длительности электромагнитных импульсов

Зависимость от эллиптичности лазерного излучения

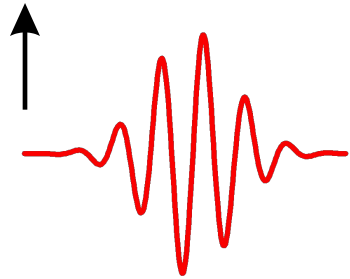
линейная поляризация



эллиптическая поляризация



WAYS OF A SINGLE ATTOPULSE GENERATION:



“AMPLITUDE GATING”

Very short (less than 5fs) fundamental pulse

Hentschel *et. al.*: *Nature* **414**, 509 (2001)

WAYS OF A SINGLE ATTOPULSE GENERATION:

“AMPLITUDE GATING”

Very short (less than 5fs) fundamental pulse

Hentschel *et. al.*: *Nature* **414**, 509 (2001)

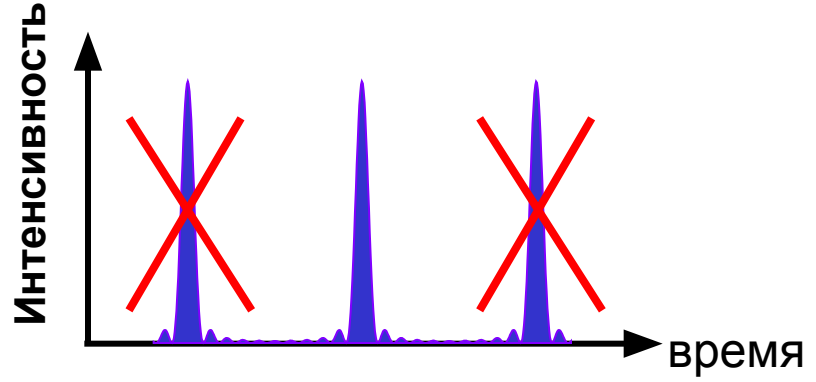
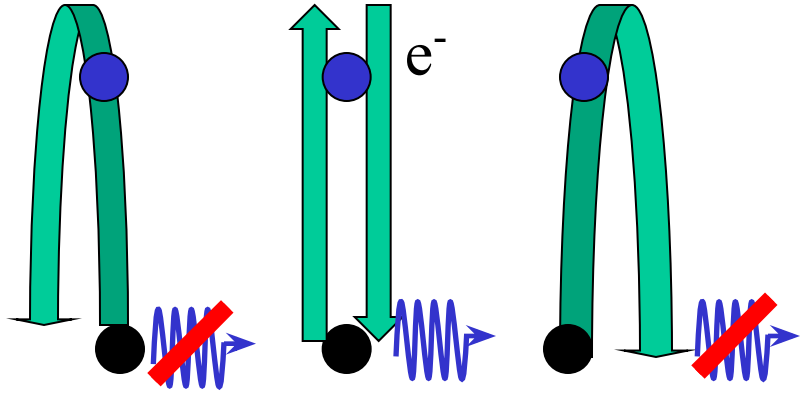
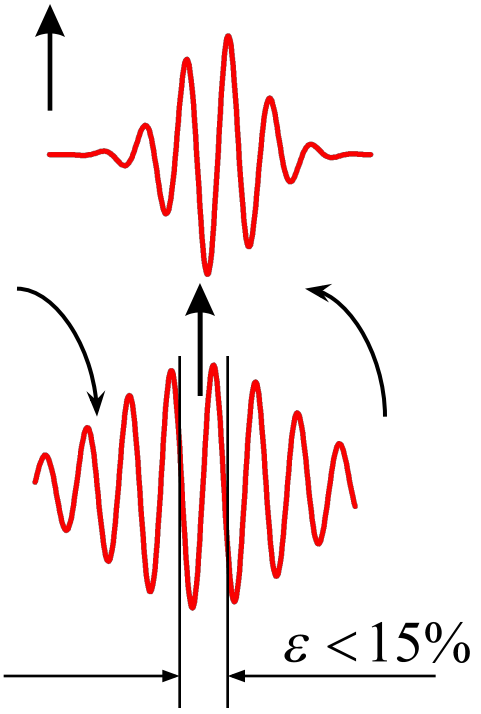
“ELLIPTICITY GATING”

Ellipticity-modulated fundamental pulse

Corkum, *et. al.*: *Optics Letters* **19**, 1870 (1994)

Platonenko, Strelkov: *JOSA. B* **16**, 435 (1999)

Sola, *et. al.*, *Nature Physics*, **2**, 281(2006)

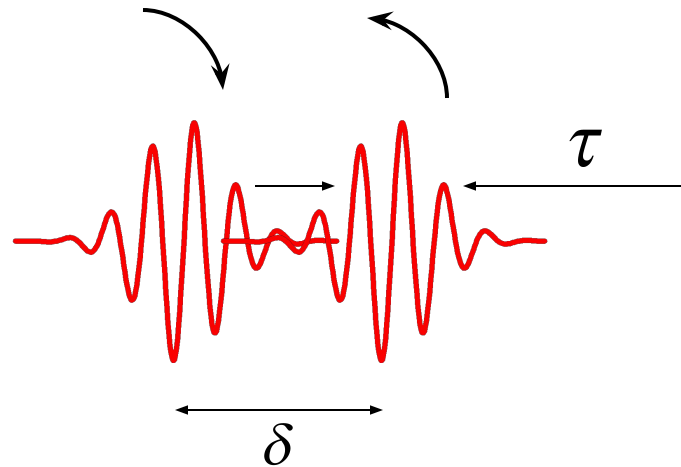
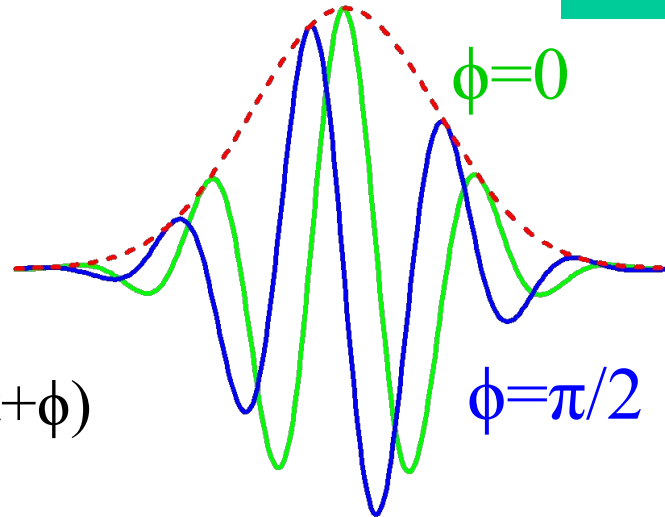


Carrier-

Envelope

Phase

$$E(t) = F(t) \cos(\omega t + \phi)$$



Field with time-varying ellipticity:
Platonenko, Strelkov *JOSA B* (1999)

$$\Delta = \frac{\varepsilon_{th} \tau^2}{\delta \ln 2}$$

ε_{th} – threshold ellipticity

Strelkov V., et. al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* (2005)

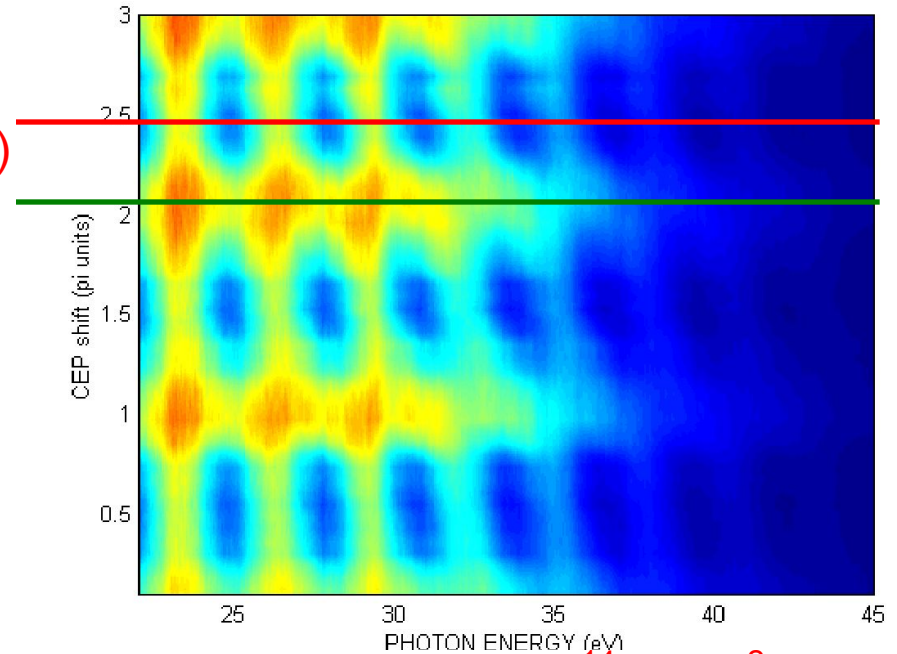
theory: V. Strelkov, PRA, 2006

experiment+simulation:

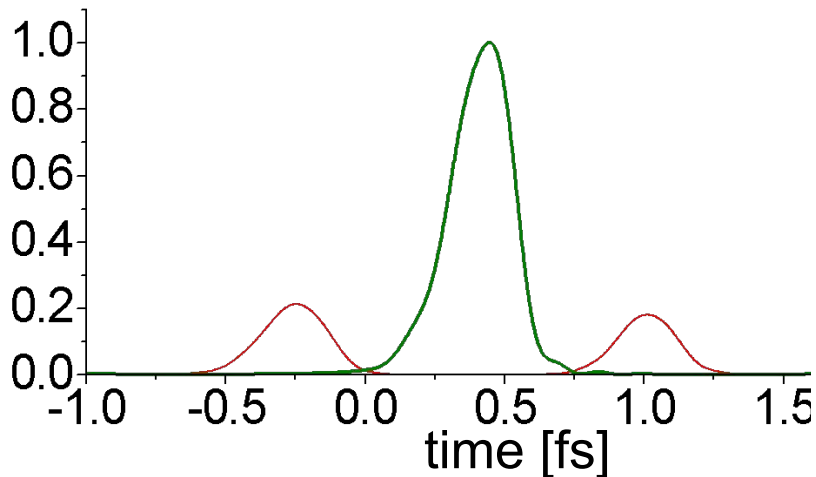
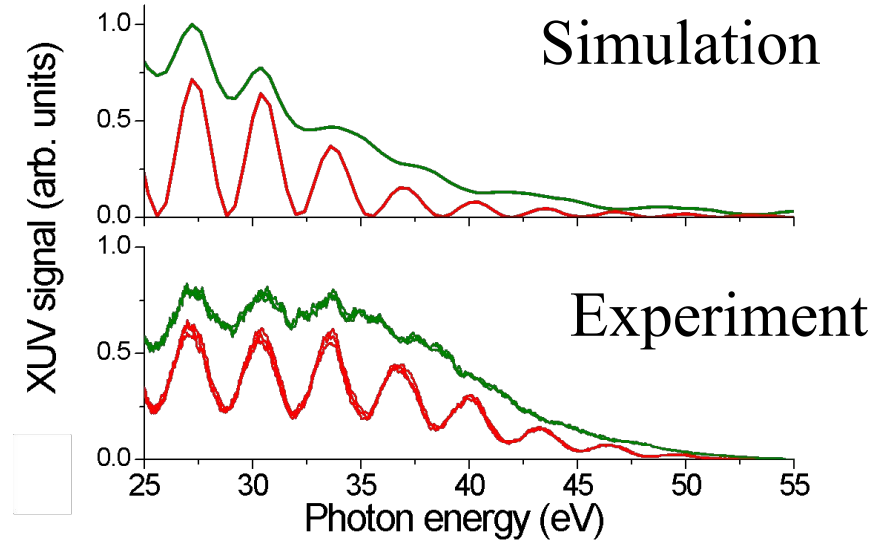
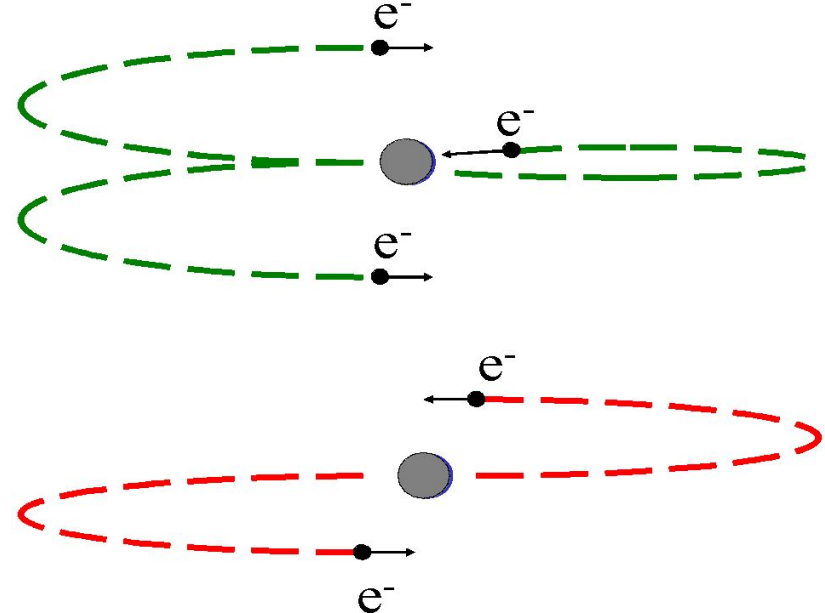
Sola, et. al., *Nature Physics*, 2, 281(2006)

Sansone G, et. al., *Science* 314 443 (2006)

ELLIPTICITY GATING



Ar, 5fs pulse, $2.2 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$



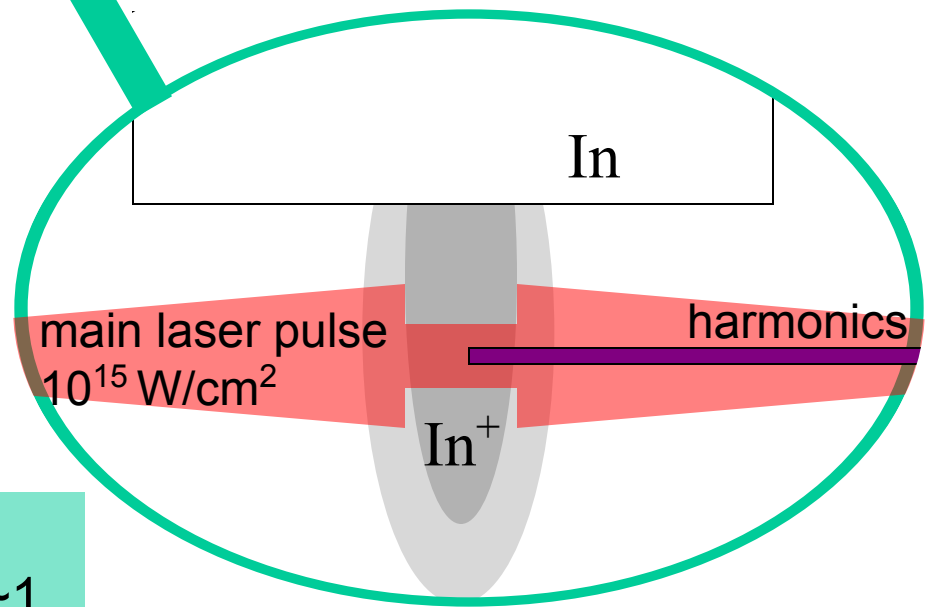
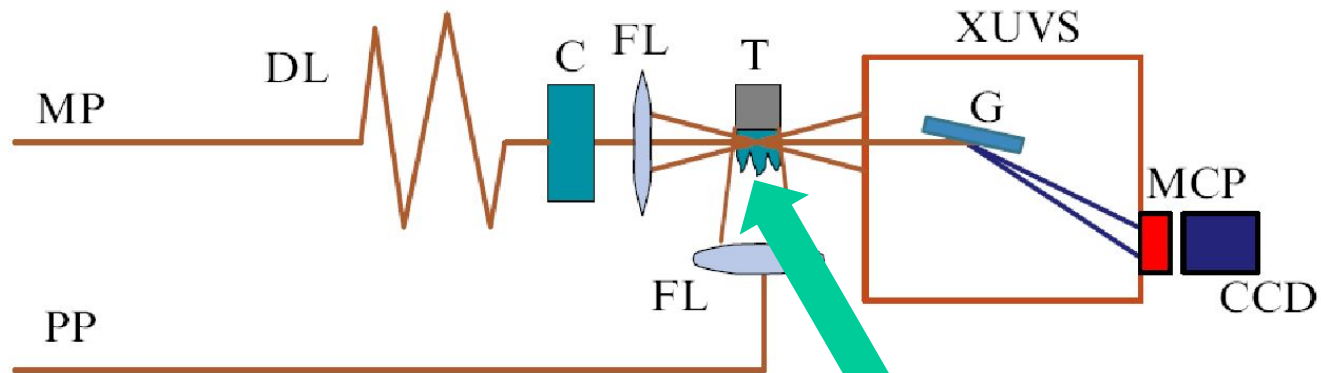
План:

Генерация высоких гармоник при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с газами. Современные достижения в области получения аттосекундных импульсов.

Резонансная генерация высоких гармоник: путь повышения эффективности генерации.

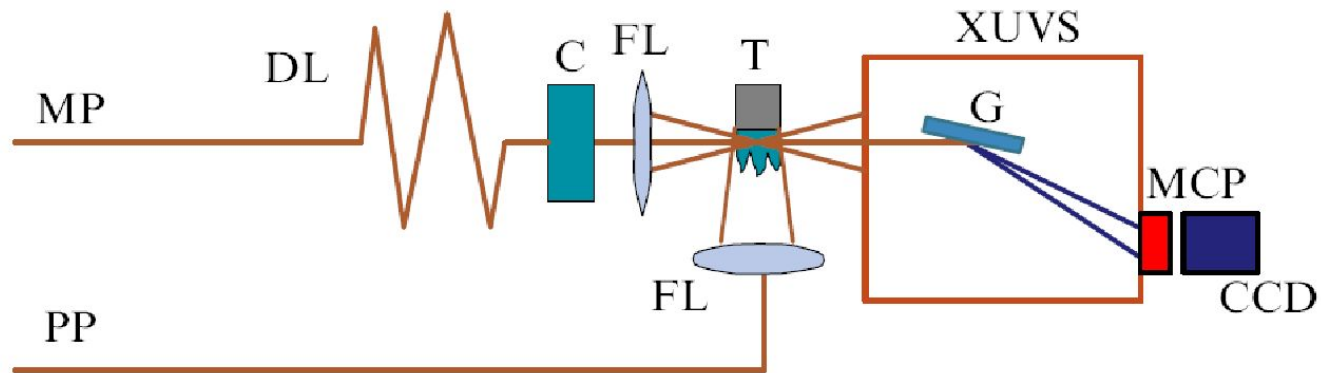
Генерация когерентного ультрафиолетового и рентгеновского излучения при взаимодействии сверхинтенсивного лазерного излучения с поверхностью

Resonant HHG: review of experiments

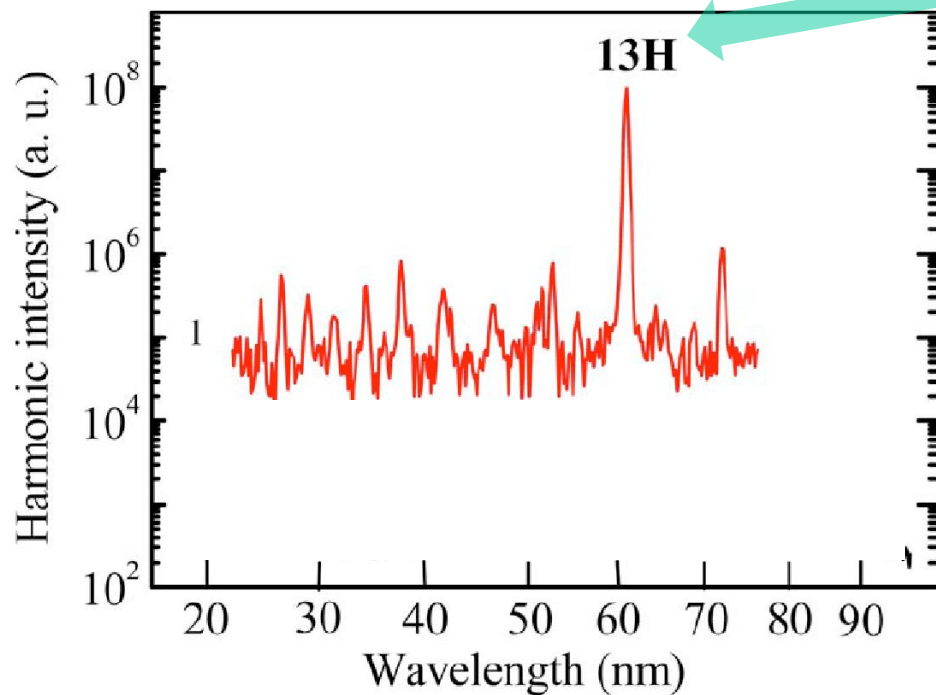


$10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
ionization degree ~ 1

Resonant HHG: review of experiments



efficiency 10^{-4}
strong ellipticity
dependence



R. A. Ganeev, *Physics-Uspekhi*, **52**, 55 (2009).

R. A. Ganeev, L. B. Elouga Bom, J.-C. Kieffer, and T. Ozaki, *Phys Rev A* **75**, 063806 (2007).

R. A. Ganeev, M. Suzuki, M. Baba, H. Kuroda, T. Ozaki, *Opt. Lett.*, **31**, 1699 (2006).

...

Experiment A. D. Shiner, B. E. Schmidt, C. Trallero-Herrero, H. J. Wörner, S. Patchkovskii, P. B. Corkum, J.-C. Kieffer, F. Légaré and D. M. Villeneuve, *Nature Phys.*, March 6, 2011

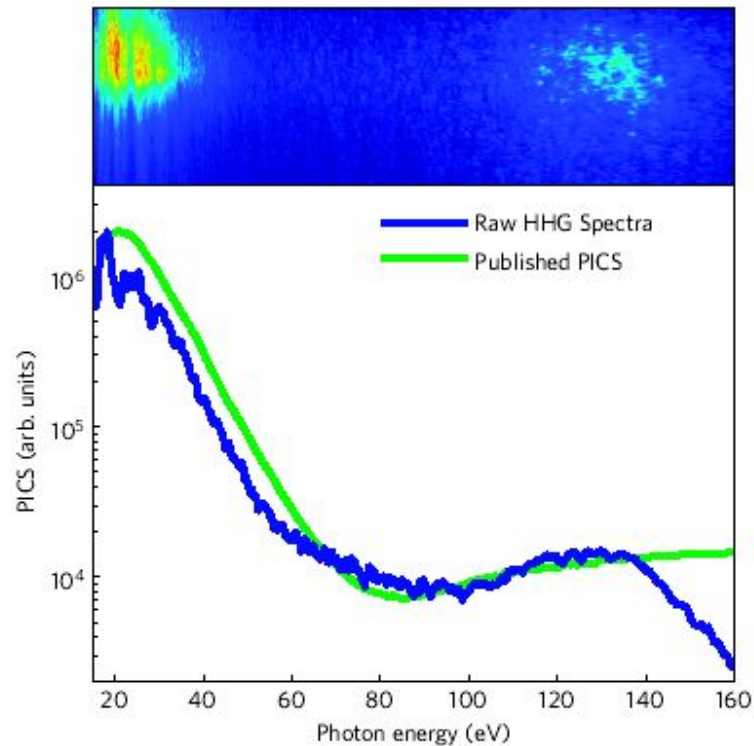


Figure 2 | Results for krypton. Top, raw HHG spectrum from krypton at $1.8 \times 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ in an image taken from a CCD (charge-coupled device) camera. The horizontal scale has been stretched to be linear in frequency rather than wavelength. Bottom, experimental spectrum (blue) from integrating the CCD image vertically, including the Jacobian of the transformation from wavelength to frequency; published photoionization cross-section²¹ (PICS; green).

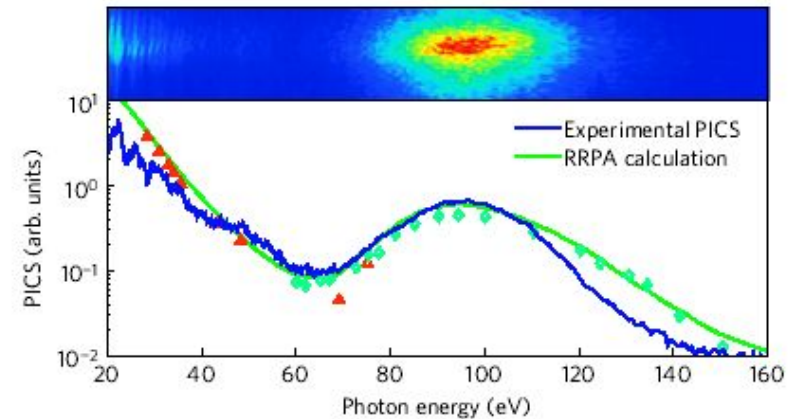
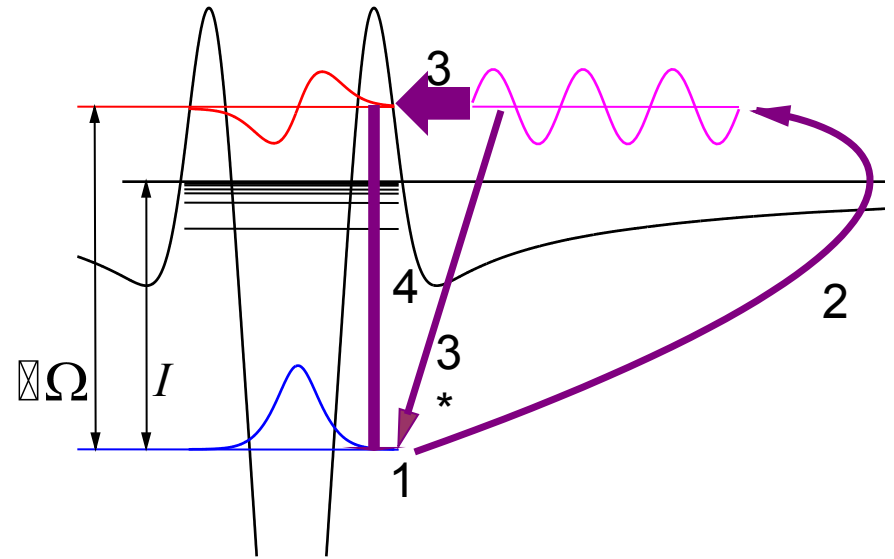
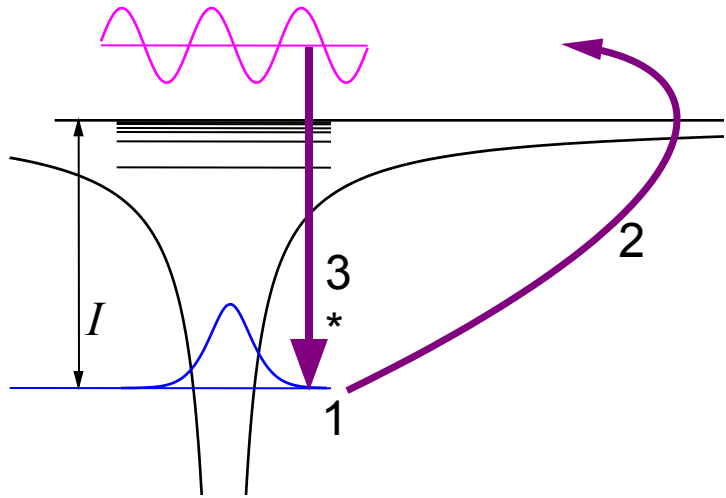


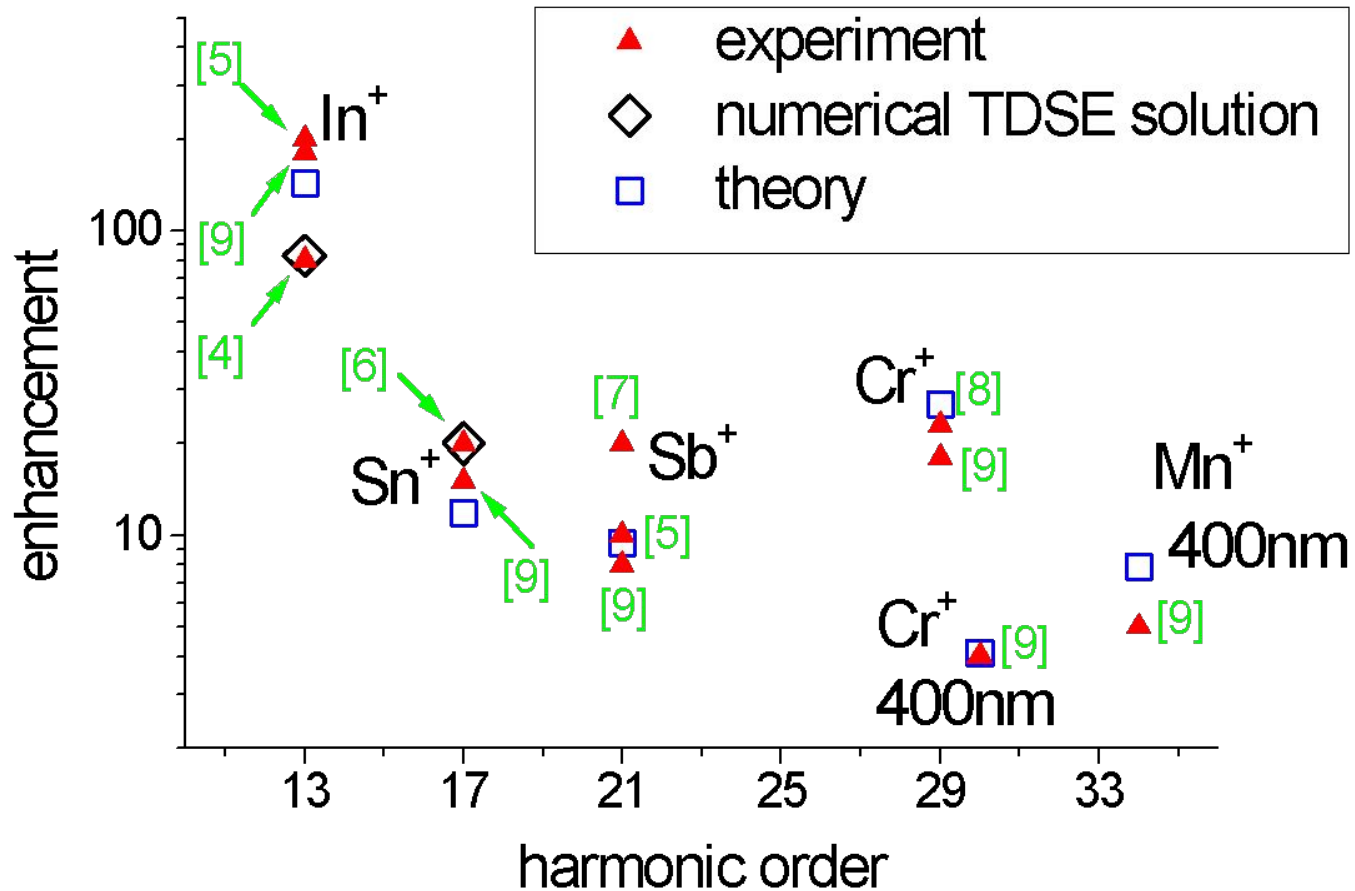
Figure 3 | Results for xenon. Top, the raw HHG spectrum from xenon at an intensity of $1.9 \times 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$. The horizontal scale has been stretched to be linear in frequency rather than wavelength. Bottom, experimental HHG spectrum divided by the krypton wave packet (blue) and the relativistic random-phase approximation (RRPA) calculation of the xenon photoionization cross-section (PICS) from ref. 25 (green). The red and green symbols are PICS measurements from refs 31 and 24 respectively, each weighted using the anisotropy parameter calculated in ref. 25.

Resonant HHG model



V. Strelkov, PRL, 2010

Resonant harmonic enhancement: comparison of the experimental, numerical and analytical results



План:

Генерация высоких гармоник при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с газами. Современные достижения в области получения аттосекундных импульсов.

Резонансная генерация высоких гармоник: путь повышения эффективности генерации.

Генерация когерентного ультрафиолетового и рентгеновского излучения при взаимодействии сверхинтенсивного лазерного излучения с поверхностью

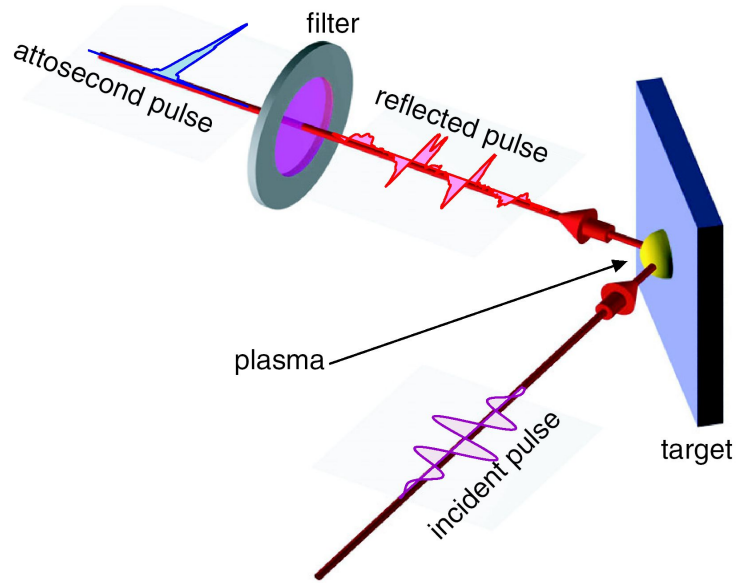


Figure 7. Scheme showing the proposed experimental configuration for the generation of attosecond pulses using harmonics from overdense plasmas.

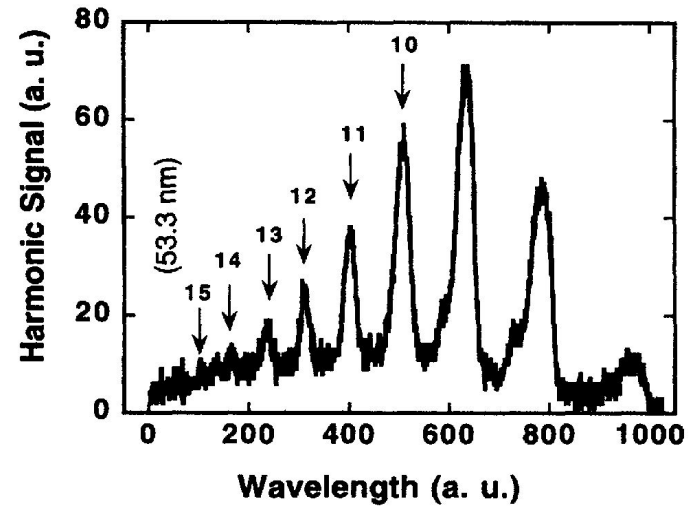


FIG. 2. Harmonic spectrum from an aluminum film. The vertical arrows indicate the order of the harmonics.

D. von der Linde, 1995

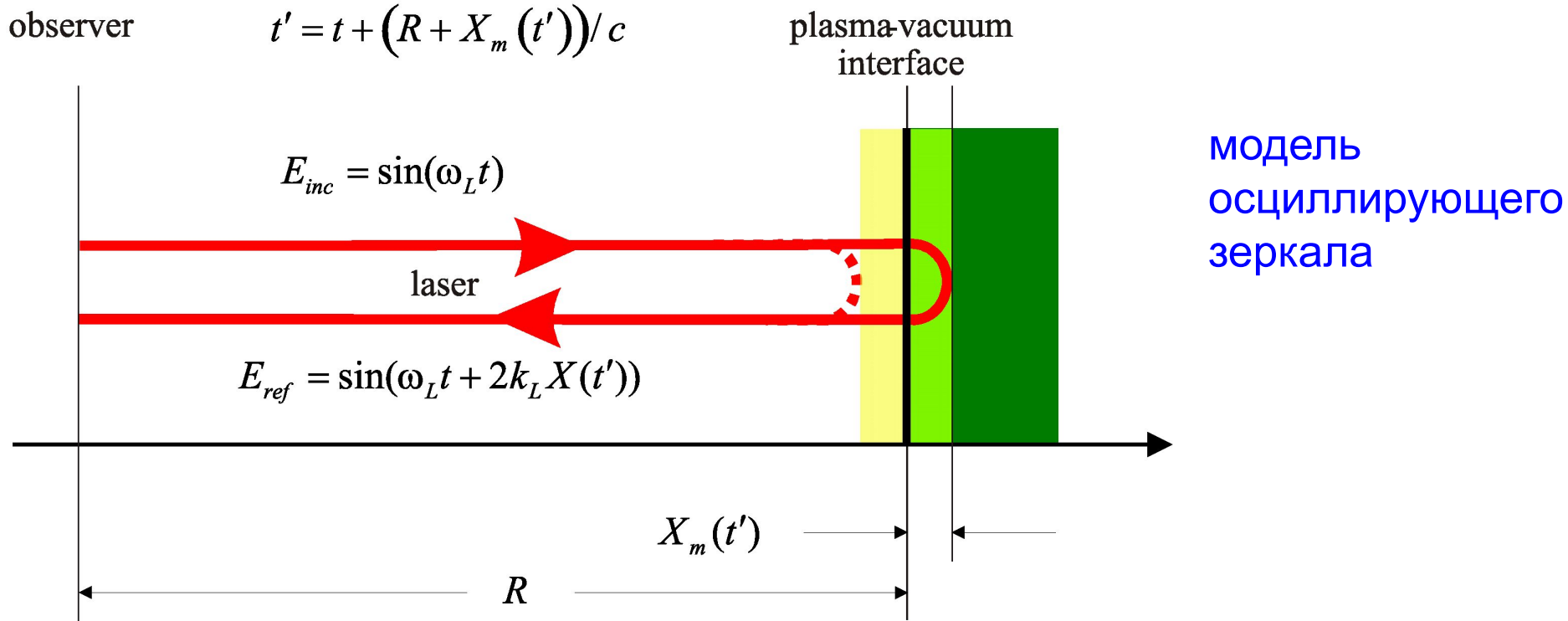
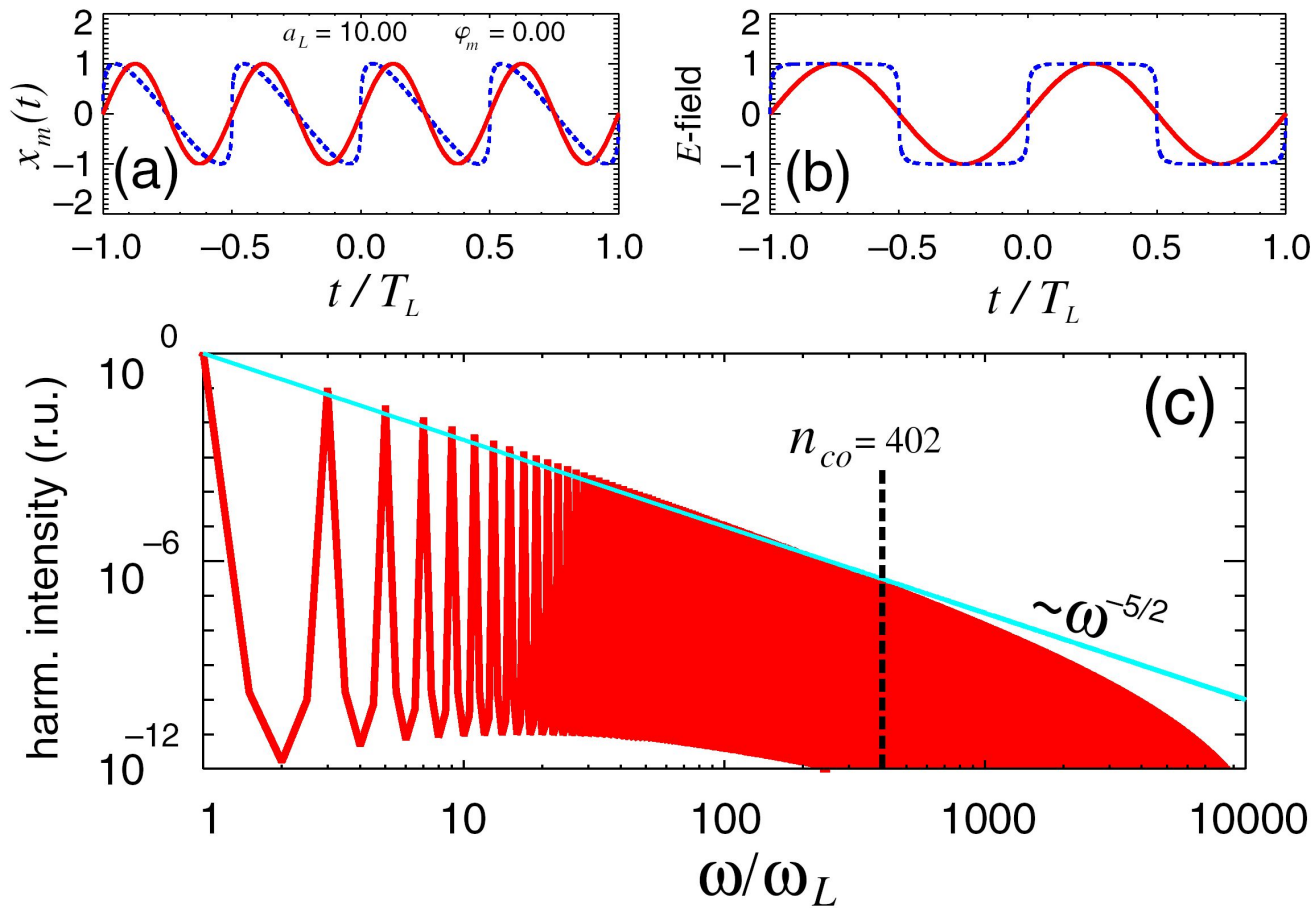


Figure 1. Scheme showing the basic idea of the oscillating mirror model. An E-M wave is incident on an electron surface oscillating around an immovable ion background. The phase of the reflected E-M wave as seen by the observer depends on the position of the electron surface at the moment of the reflection. This retardation effect gives rise to a distorted waveform rich in harmonics of the fundamental frequency.

S. V. Bulanov, 1994

von der Linde , 1996



модель
осциллирующего
зеркала

Figure 2. Predictions of the oscillating mirror model for $a_L = 10$. (a) Motion of the mirror in its own frame (—) and as seen by the incident wave (---). (b) The incident (—) and the reflected (---) E-M field as seen by the observer. (c) The power spectrum is obtained by Fourier transforming the reflected field. The roll-off follows closely the predicted power law $1/\omega^q$ with $q \approx 5/2$. The value for the cut-off harmonic n_{co} is calculated using equation (3).

Tsakiris, 2006

Благодарности:

V.T. Платоненко, физический ф-т МГУ

E.Constant, E.Mevel, CELIA, Bordeaux, France

М.Ю.Рябикин, А.А. Гоносков , ИПФ РАН, Нижний Новгород

Выводы:

При генерации высоких гармоник интенсивного лазерного излучения в газах получены аттосекундные ультрафиолетовые импульсы длительностью около 100 ас. Многие особенности процесса могут быть поняты в рамках трехступенчатой модели и основанных на ней квантовомеханических теориях.

Резонансная генерация высоких гармоник позволяет существенно увеличить эффективность процесса.

Расчеты показывают, что при взаимодействии лазерного излучения релятивистской и ультрарелятивистской интенсивности с поверхностью возможна генерация аттосекундных импульсов длительностью около 1 ас и интенсивностью, существенно превышающей интенсивность генерирующего излучения.