

Когерентное управление электронной эмиссией в полях вакуумно-ультрафиолетового диапазона

Elena V. Gryzlova

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
Lomonosov Moscow State University



Moscow, 11 March 2021

Acknowledgments

Team: Maria M. Popova, Maxim D. Kiselev, Ekaterina I. Staroselskaya
Alexei N. Grum-Grzhimailo

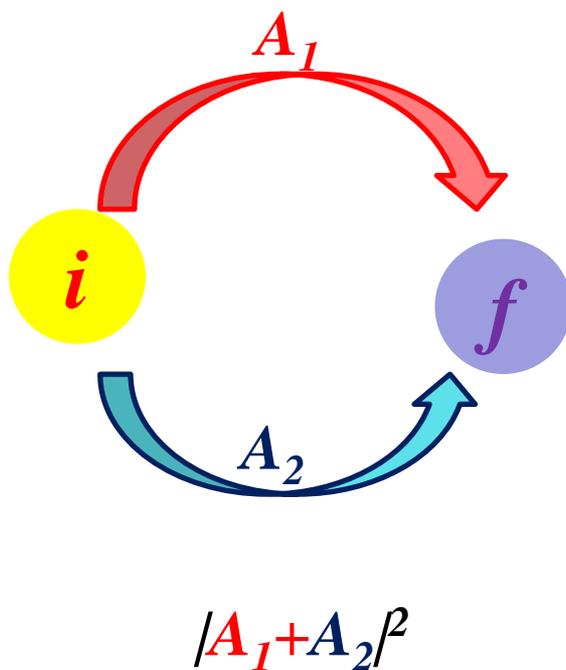
Theory N. Douguet, J. Venzke and K. Bartschat

Experiment **K. C. Prince**, E. Allaria, C. Callegari, R. Cucini, G. De Ninno, S. Di Mitri, B. Diviacco, E. Ferrari, P. Finetti, D. Gauthier, L. Giannessi, N. Mahne, G. Penco, O. Plekan, L. Raimondi, P. Rebernik, E. Roussel, C. Svetina, M. Trovò, M. Zangrando, M. Negro, P. Carpeggiani, M. Reduzzi, **G. Sansone**, D. Iablonskyi, Y. Kumagai, T. Takanashi, **K. Ueda**, A. Fischer, M. Coreno, F. Stienkemeier, Y. Ovcharenko, T. Mazza and **M. Meyer**

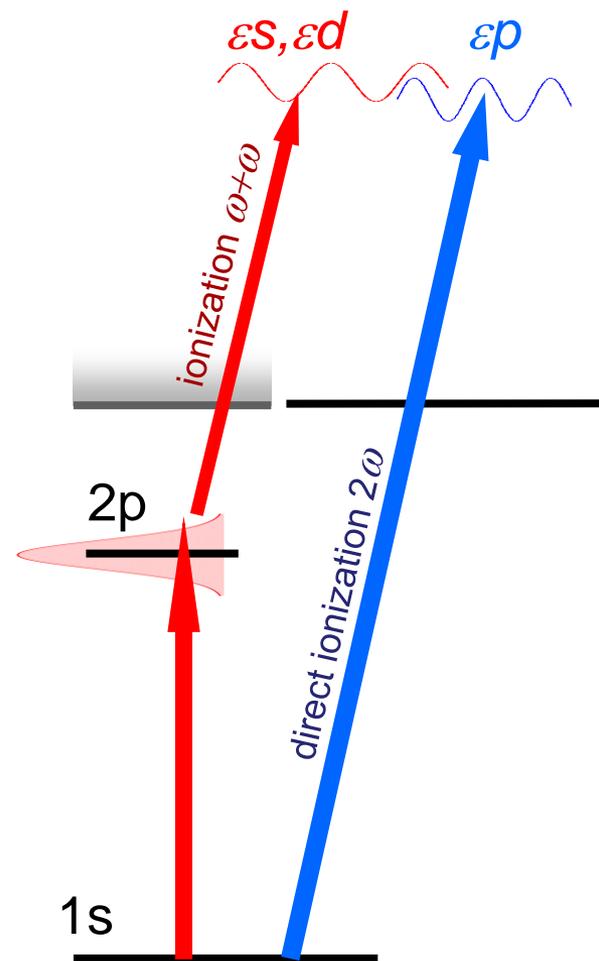


The research is supported by the Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics BASIS via the Junior Leader program

Когерентное управление



Интерференция εs & εd неуправляемая
Интерференция $\varepsilon s, \varepsilon d$ & εp управляемая



Outline

Цель - исследовать как контролировать и управлять вероятностью и направлением электронной эмиссии и поляризации спина электрона, изменяя параметры и бихроматических полей, генерируемых современными ЛСЭ.

❑ **Введение: Схема процесса и первые эксперименты**

❑ Симметрии поля и угловых распределений

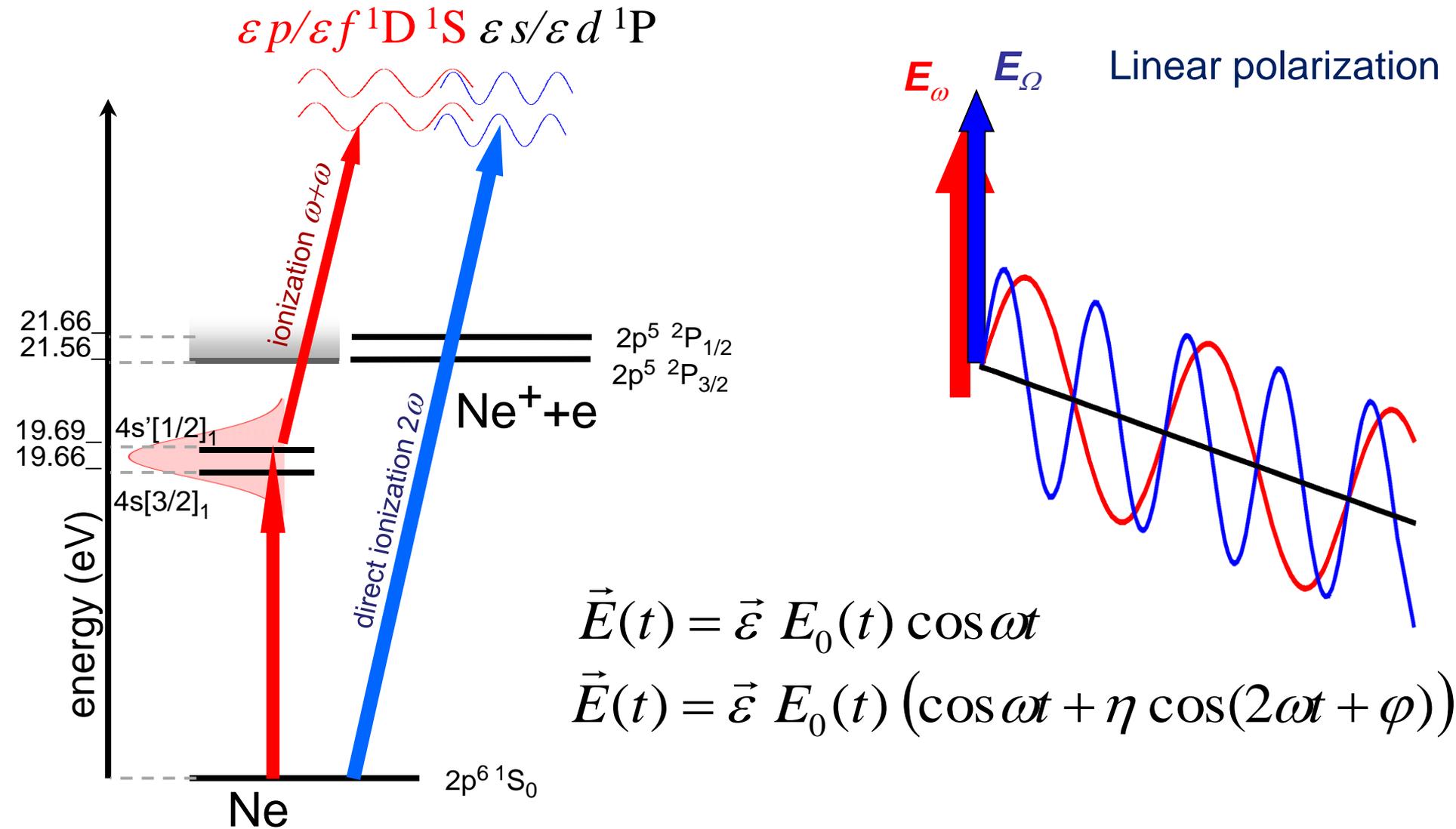
❑ Метод

❑ Управляющие(контролирующие) параметры

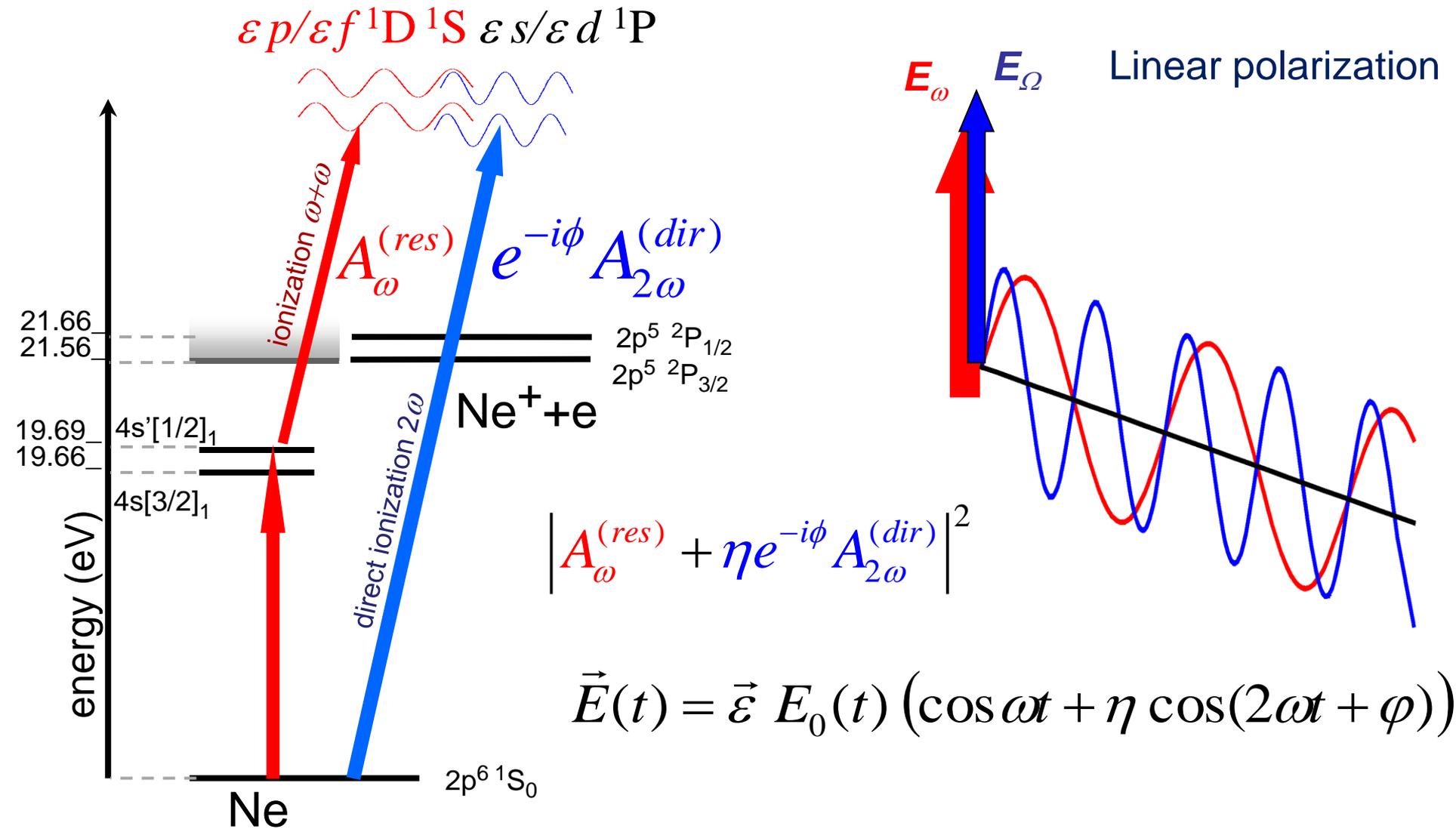
❑ Поляризация спина фотоэлектрона

❑ Возможность определить параметры излучения

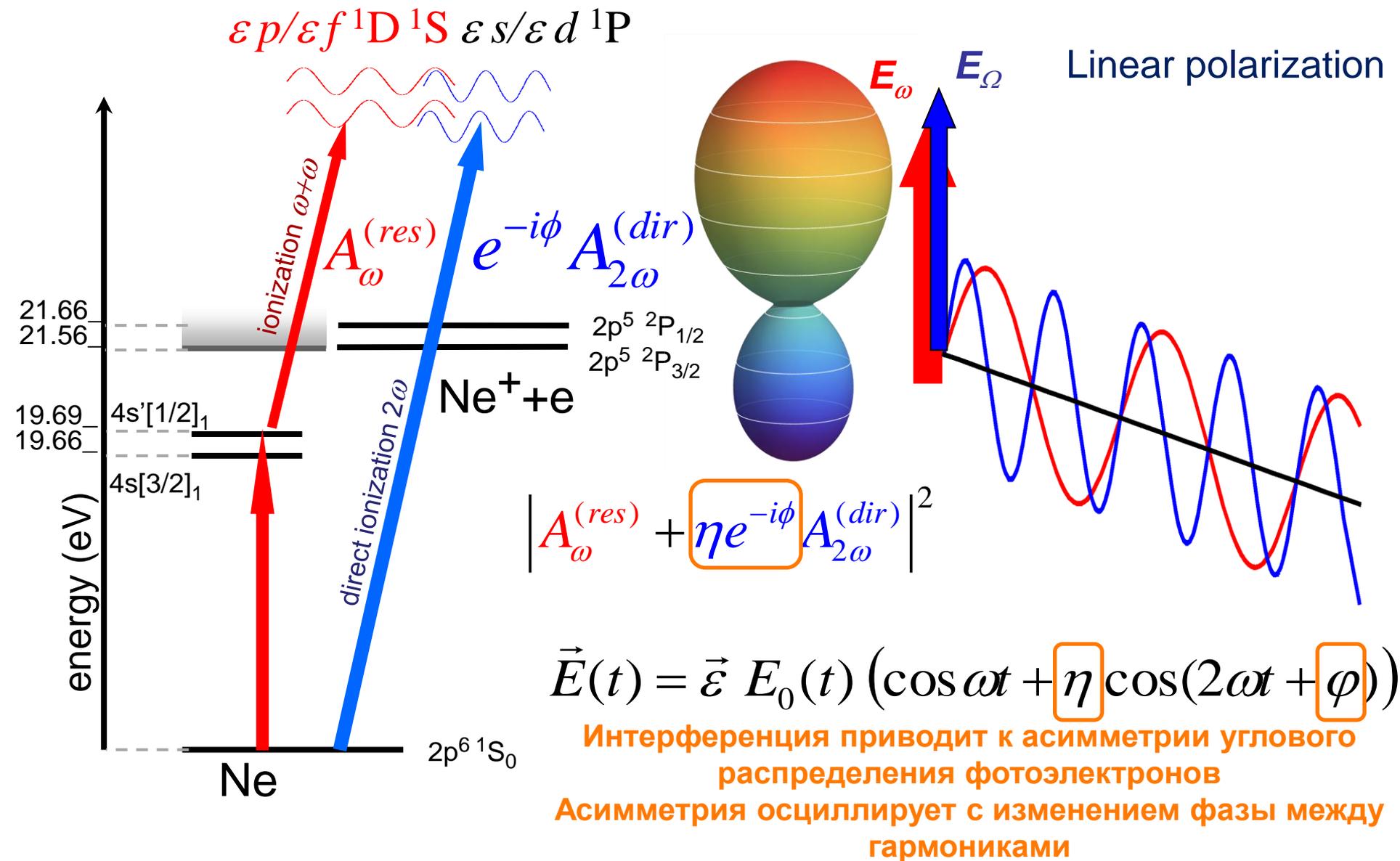
Scheme of photoemission control



Scheme of photoemission control



PAD control



Realization in optical region

Theory and observation of polar asymmetry of photoionization in a field with $\langle E^3 \rangle \neq 0$

Zh. Eksp. Teor. Fiz. **98**, 1857 (1990)
[Sov. Phys. JETP **71**, 1043 (1990)].
N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich,
A. N. Chudinov, and A. A. Shul'ginov,

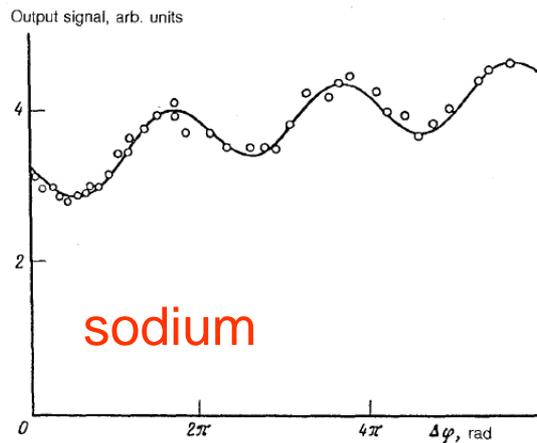
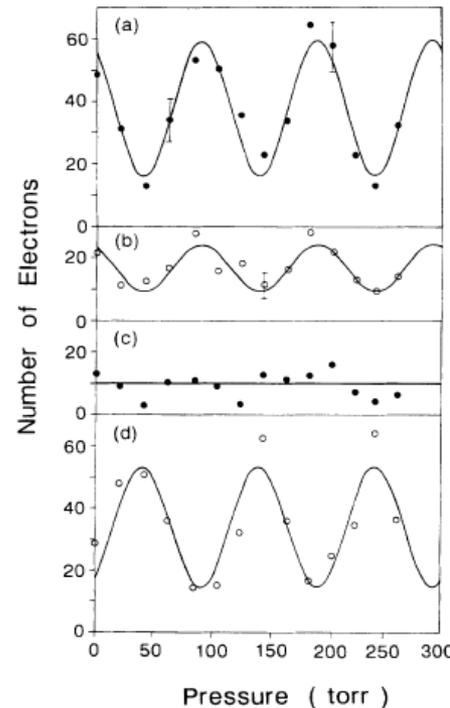


FIG. 4. Experimental output signal from the electron multiplier as a function of the phase shift $\Delta\varphi$ between the fields $E(2\omega_1)$ and $E(\omega_1)$.

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 55, 431 (1992)

Asymmetric Photoelectron Angular Distributions from Interfering Photoionization Processes

Chem. Phys. Lett. **241**, 591 (1995).
Y.-Y. Yin, D. S. Elliott, R. Shehadeh,
and E. R. Grant



Rubidium

Brumer – Shapiro cc

Experiments in VUV region

nature
photonics

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

Nature Photonics **10**, 176, (2016).

K. C. Prince, E. Allaria, C. Callegari, R. Cucini, G. De Ninno, S. Di Mitri, B. Diviacco, E. Ferrari, P. Finetti, D. Gauthier, L. Giannessi, N. Mahne, G. Penco, O. Plekan, L. Raimondi, P. Rebernik, E. Roussel, C. Svetina, M. Trovò, M. Zangrando, M. Negro, P. Carpeggiani, M. Reduzzi, G. Sansone, A. N. Grum-Grzhimailo, E. V. Gryzlova, S. I. Strakhova, K. Bartschat, N. Douguet, J. Venzke, D. Iablonskyi, Y. Kumagai, T. Takanashi, K. Ueda, A. Fischer, M. Coreno, F. Stienkemeier, Y. Ovcharenko, T. Mazza and M. Meyer

Coherent control schemes for the photoionization of neon and helium in the Extreme Ultraviolet spectral Region

Scientific reports, **7**, 7774 (2018)

L. Giannessi, E. Allaria, K. C. Prince, C. Callegari, G. Sansone, K. Ueda, T. Morishita, C. N. Liu, A. N. Grum-Grzhimailo, E. V. Gryzlova, N. Douguet & K. Bartschat

Complete characterization of phase and amplitude of bichromatic XUV light

Phys. Rev. Lett. **123**, 213904 (2019)

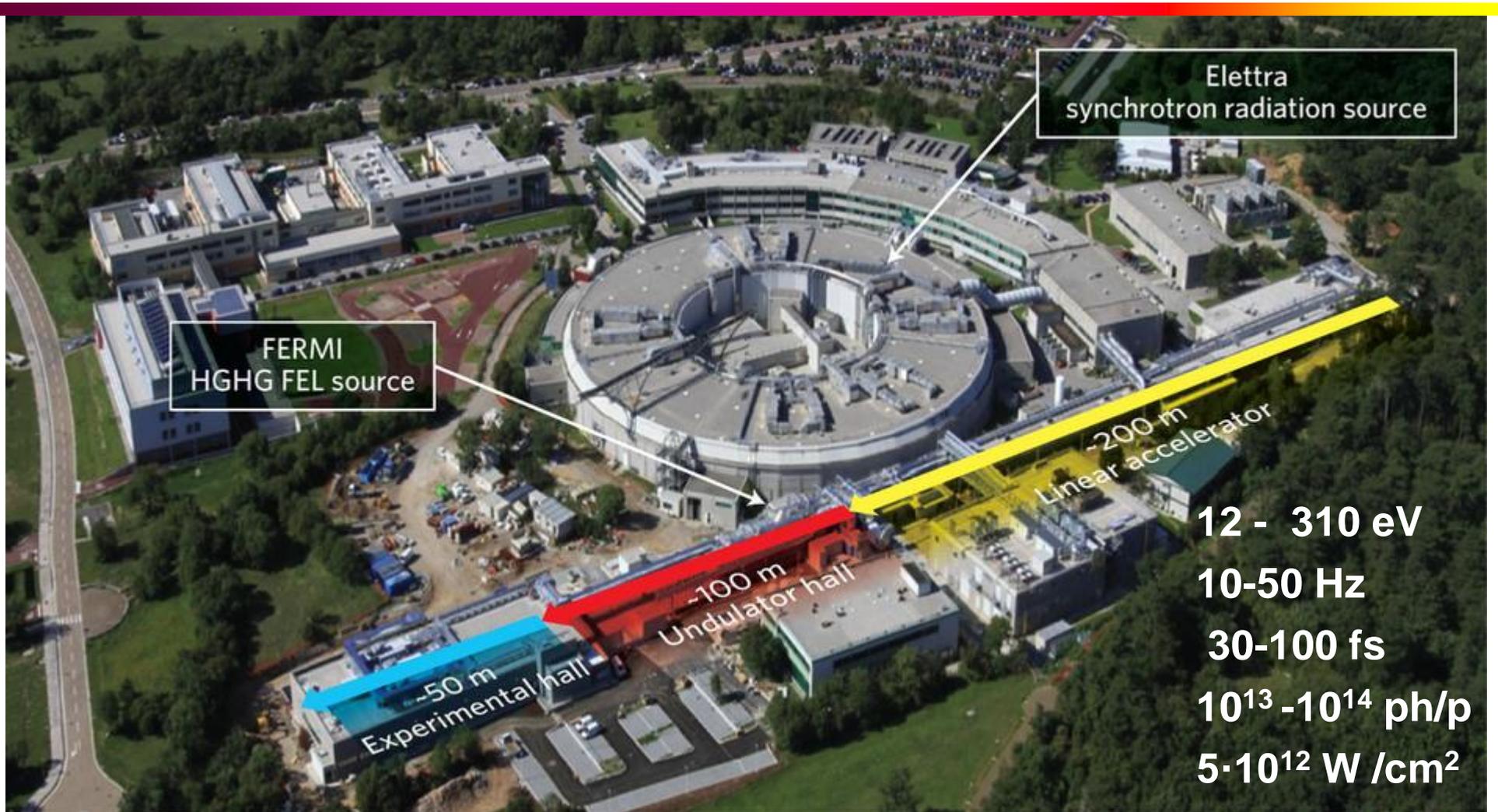
E. Ferrari, O. Plekan, C. Callegari, K. C. Prince, E. Allaria, R. Cucini, G. De Ninno, S. Di Mitri, B. Diviacco, P. Finetti, D. Gauthier, L. Giannessi, N. Mahne, G. Penco, L. Raimondi, P. Rebernik, E. Roussel, C. Svetina, M. Trovò, M. Zangrando, M. Negro, P. Carpeggiani, M. Reduzzi, G. Sansone, A. N. Grum-Grzhimailo, D. Iablonskyi, Y. Kumagai, T. Takanashi, K. Ueda, A. Fischer, M. Coreno, F. Stienkemeier, Y. Ovcharenko, T. Mazza, M. Meyer, E. V. Gryzlova, A. N. Grum-Grzhimailo, D. You and K. Ueda

New Method for Measuring Angle-Resolved Phases in Photoemission

Physical Review X, **10**, 031070 (2020)

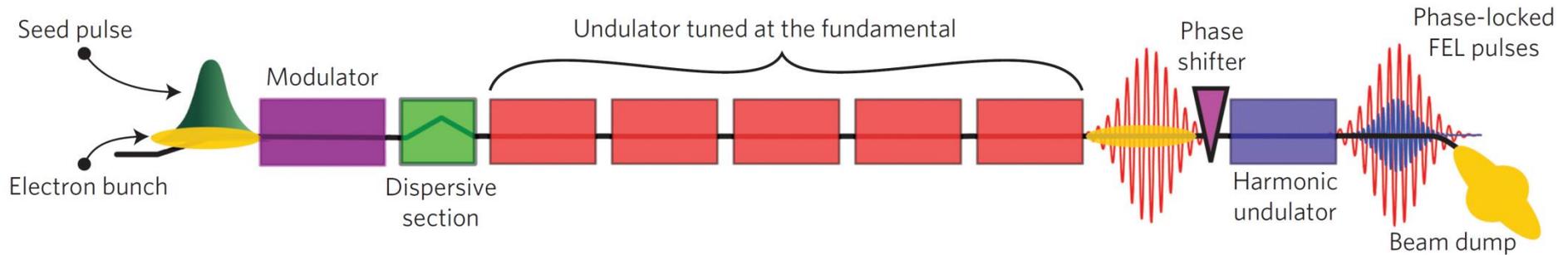
You D., Ueda K., Gryzlova E.V., Grum-Grzhimailo A.N., Popova M.M., Staroselskaya E.I., Tugs O., Orimo Y., Sato T., Ishikawa K.L., Carpeggiani P.A., Csizmadia T., Füle M., Sansone G., Maroju P.K., D'Elia A., Mazza T., Meyer M., Callegari C., Di Fraia M., Plekan O., Richter R., Giannessi L., Allaria E., De Ninno G., Trovò M., Badano L., Diviacco B., Gaio G., Gauthier D., Mirian N., Penco G., Ribič P.R., Spampinati S., Spezzani C., Prince K.C.

FERMI

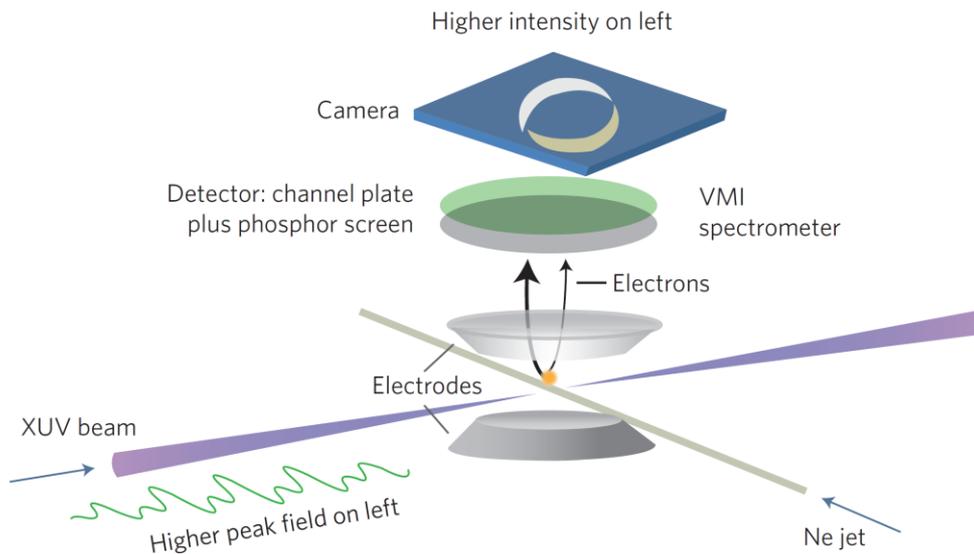


FERMI (Триест, Италия) – первый ЛСЭ, работающий в ВУФ, с высокой временной когерентностью и изменяемой поляризацией излучения

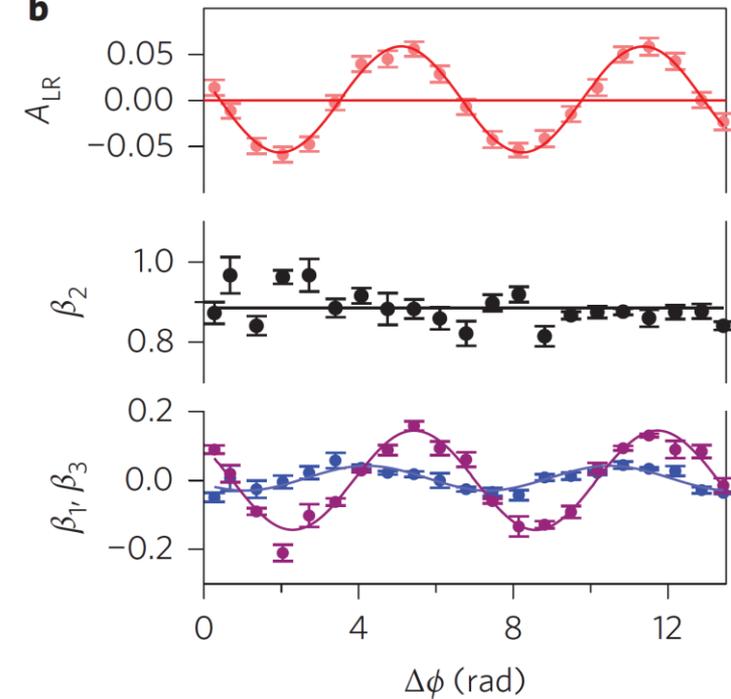
The experiment



a



b



Достигнут контроль за движением электронов с точностью до трех аттосекунд

22/02/16

физика

Мировая наука, 24 февраля 2016

Мы в соцсетях

Физики пронаблюдали движение электронов с точностью до трех аттосекунд

22 февраля | НАУКА,Новости | ГосИндex

24.02.2016 - 13:56

УЧЕНЫЕ ДОКАЗАЛИ, ЧТО КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ МОЖНО КОНТРОЛИРОВАТЬ С ТОЧНОСТЬЮ ДО НЕСКОЛЬКИХ АТТОСЕКУНД

МАТЕРИАЛЫ ПОРТАЛА «НАУЧНАЯ РОССИЯ»

24 февраля 2016 г., 9:52

Скорость контроля за частицами достигла а



Большой коллектив ученых, включая физиков из МГУ, объявил о результате: удалось управлять движением электронов с точностью до трех аттосекунд. Об этом сообщает журнал Nature. Публикация в журнале Nature

Впервые в мире физики смогли контролировать движения электронов с точностью до миллиардной доли миллиардной доли секунды



Международная группа ученых при участии физиков из МГУ имени М.В.Ломоносова впервые в мире смогла доказать, что возможно контролировать квантовые процессы с точностью до

Новости

Как измерить мгновение?

Международная команда ученых при участии физиков из МГУ впервые в мире смогла отследить квантовые процессы с точностью до нескольких аттосекунд – одной миллиардной доли миллиардной доли секунды.

Outline

Цель - исследовать как контролировать и управлять вероятностью и направлением электронной эмиссии и поляризации спина электрона, изменяя параметры и бихроматических полей, генерируемых современными ЛСЭ.

❑ Введение: Схема процесса и первые эксперименты

❑ **Симметрии поля и угловых распределений**

❑ **Метод**

❑ **Управляющие(контролирующие) параметры**

❑ **Поляризация спина фотоэлектрона**

❑ **Возможность определить параметры излучения**

Pulse parameters

$$\vec{E}(t) = \vec{\varepsilon} E_0(t) (\cos \omega t + \eta \cos(2\omega t + \varphi))$$

Polarization

Pulse duration

Intensity

Form

envelope

Ratio of first and second harmonics

Relative phase

Симметрия бихроматического поля

$$\vec{E}(t) = \boxed{\vec{\varepsilon}} \boxed{E_0(t)} (\cos \omega t + \boxed{\eta} \cos(2\omega t + \boxed{\varphi}))$$

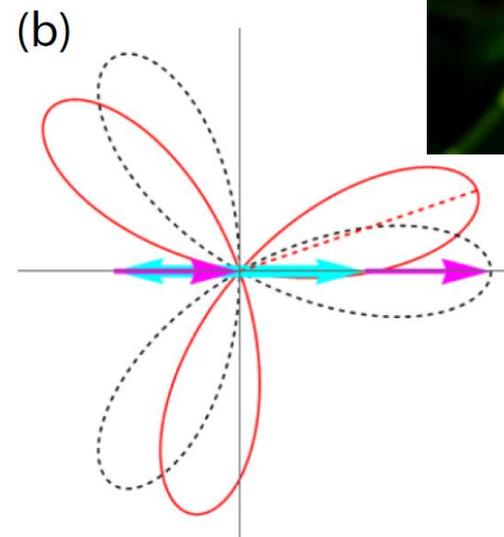
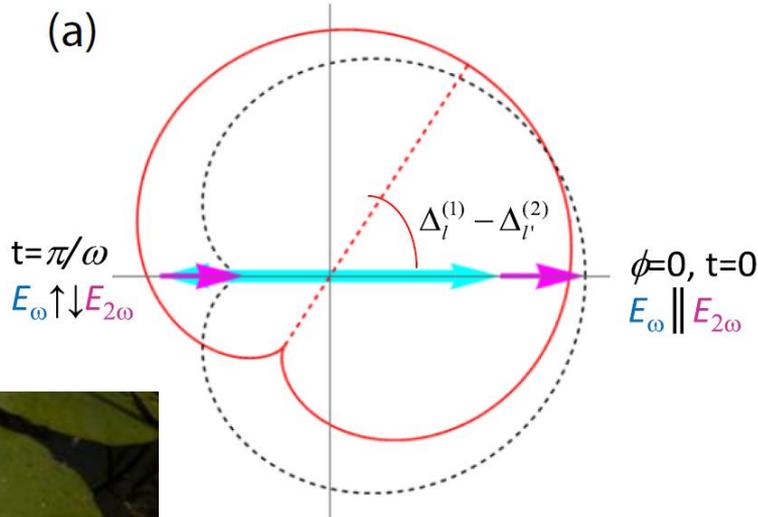
Polarization (определяет симметрию)

Relative phase

Pulse duration
Intensity
Form

envelope

Ratio of first and second harmonics



Симметрия поля и углового распределения

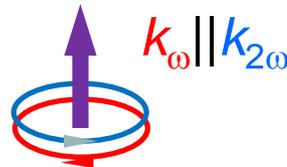
↙ **Polarization** (определяет симметрию)

$$\vec{E}(t) = \vec{\varepsilon} E_0(t) (\cos \omega t + \eta \cos(2\omega t + \varphi))$$

Линейная поляризация



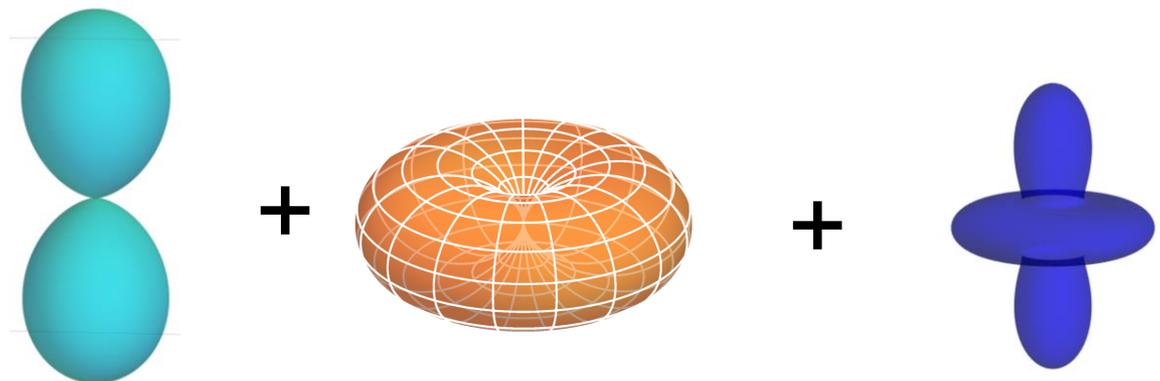
Круговая поляризация



Круговая + линейная поляризация



Если гармоники некогерентны, то все системы обладают осью симметрии и перпендикулярной ей плоскостью симметрии



Симметрия поля и углового распределения

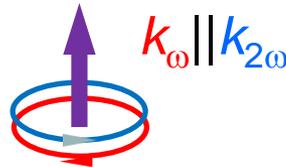
↙ **Polarization** (определяет симметрию)

$$\vec{E}(t) = \vec{\varepsilon} E_0(t) (\cos \omega t + \eta \cos(2\omega t + \varphi))$$

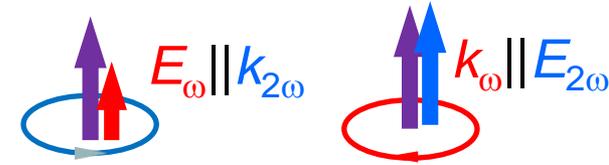
Линейная поляризация



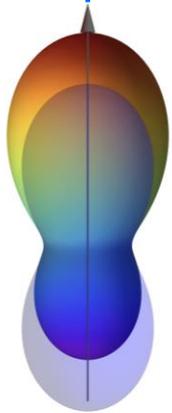
Круговая поляризация



Круговая + линейная поляризация

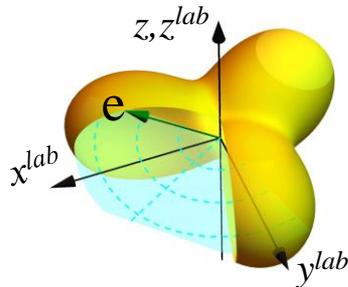


Если гармоники некогерентны, то все системы обладают осью симметрии и перпендикулярной ей плоскостью симметрии



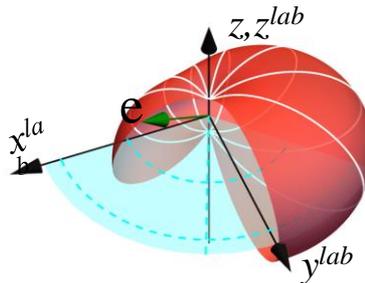
Axial

Counter-rotating

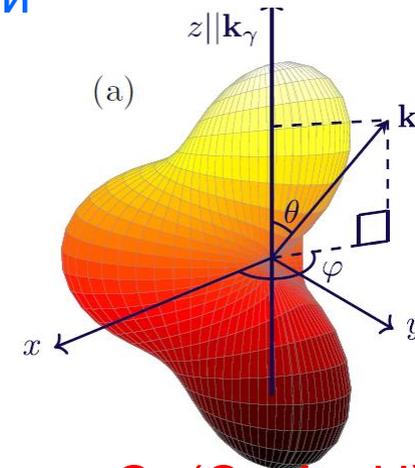


D_{3h}

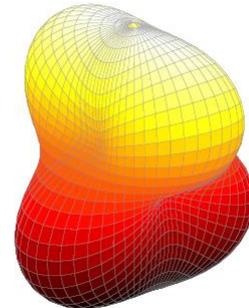
Co-rotating



C_s (C_{2v} for H)



C_s (C_{2v} for H)



S_2

Критерий реализации когерентного управления

Линейно поляризованные в одном направлении поля

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \sigma_0 \left(\underbrace{1 + \sum_{2,4} \beta_k P_k(\cos\theta)}_{\text{Incoherent sum of single- and two-photon amplitudes}} + \underbrace{\sum_{1,3} \beta_k(\varphi) P_k(\cos\theta)}_{\text{Interference of single- and two-photon amplitudes}} \right)$$

Zero-angle asymmetry

$$A(0) = \frac{\beta_1 + \beta_3}{1 + \beta_2 + \beta_4}$$

Cone-integrated asymmetry

$$A(\Omega) = \frac{\int_0^{\Omega} d\sigma - \int_{\pi-\Omega}^{\pi} d\sigma}{\int_0^{\Omega} d\sigma + \int_{\pi-\Omega}^{\pi} d\sigma}$$

Outline

Цель - исследовать как контролировать и управлять вероятностью и направлением электронной эмиссии и поляризации спина электрона, изменяя параметры и бихроматических полей, генерируемых современными ЛСЭ.

- ❑ Введение: Схема процесса и первые эксперименты
- ❑ Симметрии поля и угловых распределений
- ❑ **Метод**
- ❑ Управляющие(контролирующие) параметры
- ❑ Поляризация спина фотоэлектрона
- ❑ Возможность определить параметры излучения

Теоретический подход

Theory of angular momentum is used to express photoelectron angular distribution and degree of spin polarization in terms of transition amplitudes

Lowest non-vanishing order time-dependent perturbation theory

$$\begin{aligned}U^{(1)} &\equiv \langle E_p | \hat{U}^{(1)} | 1s \rangle \\&= -i \langle E_p | \hat{D} | 1s \rangle \int_0^{NT} e^{i(E-E_{1s})t'} \mathcal{E}(t') dt' \\U_l^{(2)} &\equiv \langle El | \hat{U}^{(2)} | 1s \rangle \\&= i^2 \sum_{E_n} \langle El | \hat{D} | E_n p \rangle \langle E_n p | \hat{D} | 1s \rangle \\&\quad \times \int_0^{NT} e^{i(E-E_n)t'} \mathcal{E}(t') \int_0^{t'} e^{i(E_n-E_{1s})t''} \mathcal{E}(t'') dt'' dt'\end{aligned}$$

$$W(\mathcal{I}, \phi, m_s) \sim |U^{(1)}(\mathcal{I}, \phi, m_s) + \eta e^{i\varphi} U^{(2)}(\mathcal{I}, \phi, m_s)|^2$$

Интерференционные члены ведут себя как $\cos(\phi-\varphi)$

Теоретический подход

$$\beta_2 = 2W_0^{-1} \left[\sqrt{5} \operatorname{Re}(U_d^{(2)} U_s^{(2)*}) + \eta^2 |U^{(1)}|^2 + \frac{5}{7} |U_d^{(2)}|^2 \right]$$

$$\beta_4 = \frac{18}{7} W_0^{-1} |U_d^{(2)}|^2,$$

$$\beta_1 = 2\sqrt{3} \eta W_0^{-1} \operatorname{Re} \left[\left(U_s^{(2)} + \frac{2}{\sqrt{5}} U_d^{(2)} \right) U^{(1)*} \right],$$

$$\beta_3 = 6\sqrt{\frac{3}{5}} \eta W_0^{-1} \operatorname{Re}(U_d^{(2)} U^{(1)*}).$$

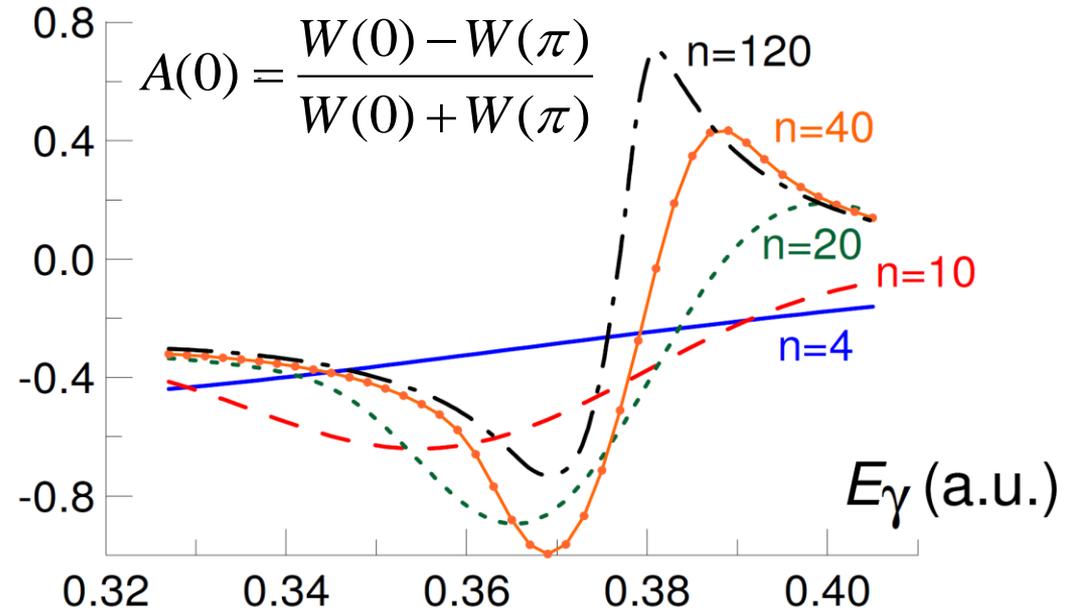
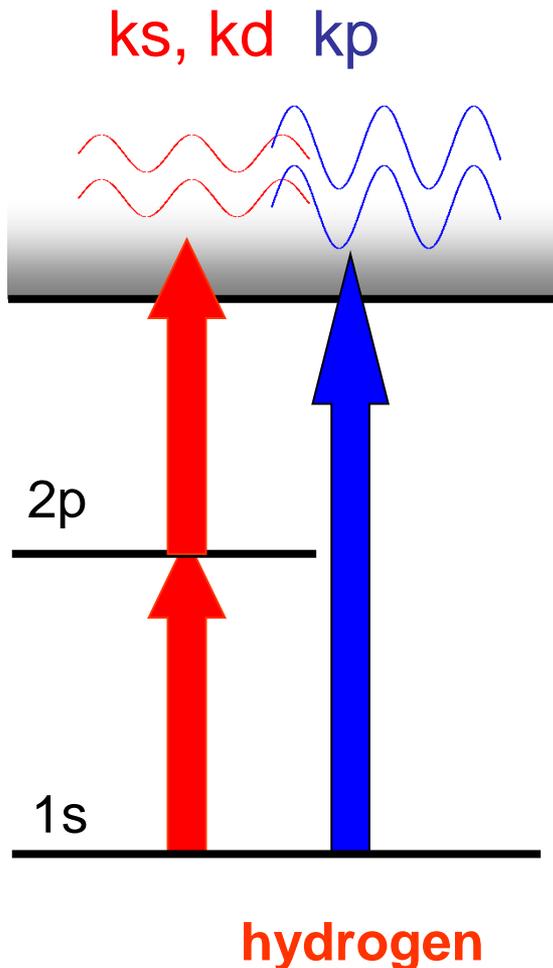
MCHF with Breit-Pauli semi-relativistic corrections to obtain energy, wavefunctions, transition amplitudes and phases.

Outline

Цель - исследовать как контролировать и управлять вероятностью и направлением электронной эмиссии и поляризации спина электрона, изменяя параметры и бихроматических полей, генерируемых современными ЛСЭ.

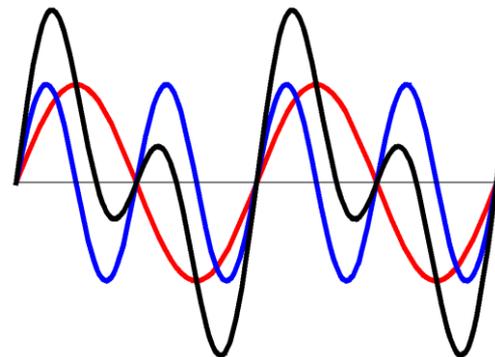
- ❑ Введение: Схема процесса и первые эксперименты
- ❑ Симметрии поля и угловых распределений
- ❑ Метод
- ❑ **Управляющие(контролирующие) параметры**
- ❑ Поляризация спина фотоэлектрона
- ❑ Возможность определить параметры излучения

Formation of the asymmetry

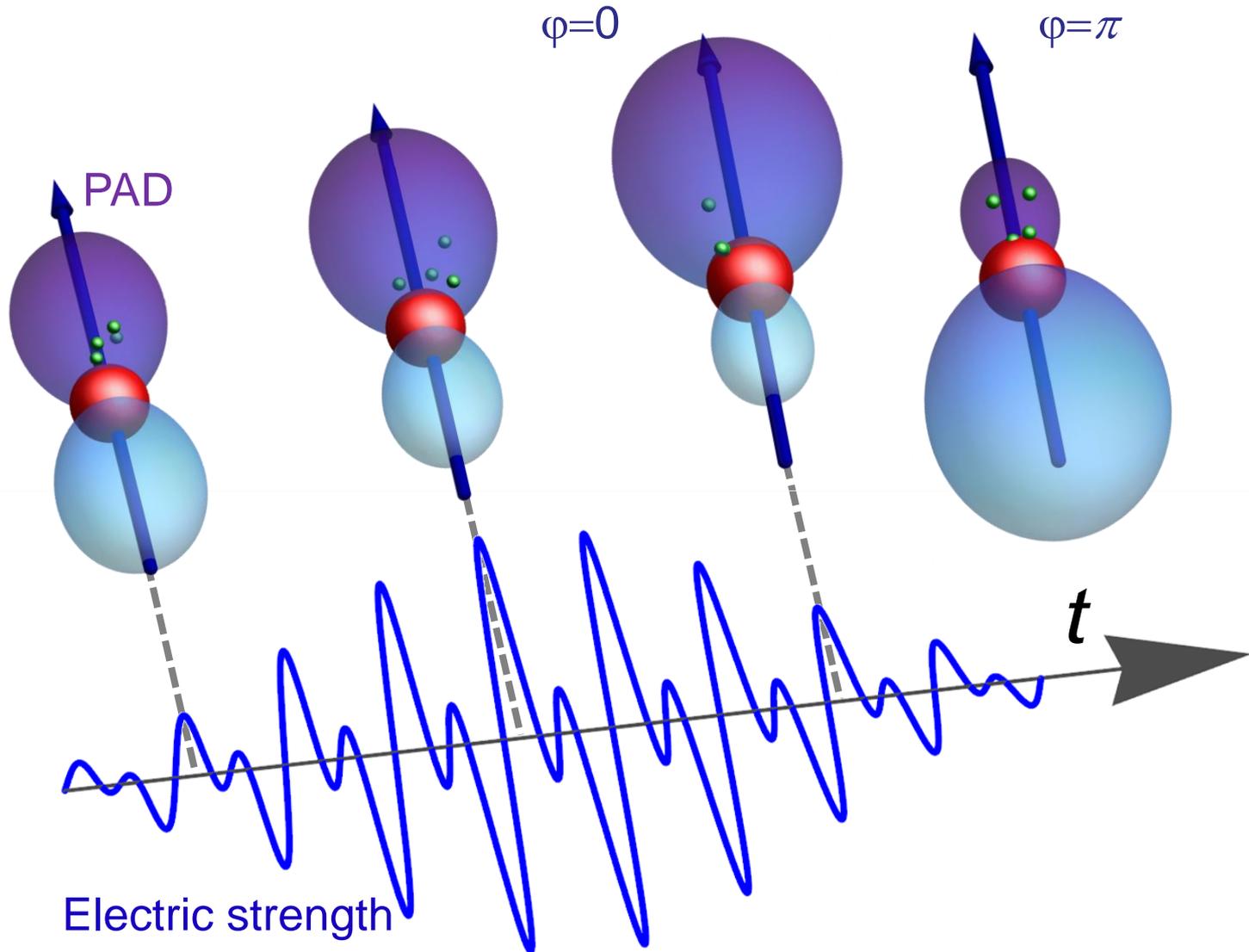


N is number of optical cycles

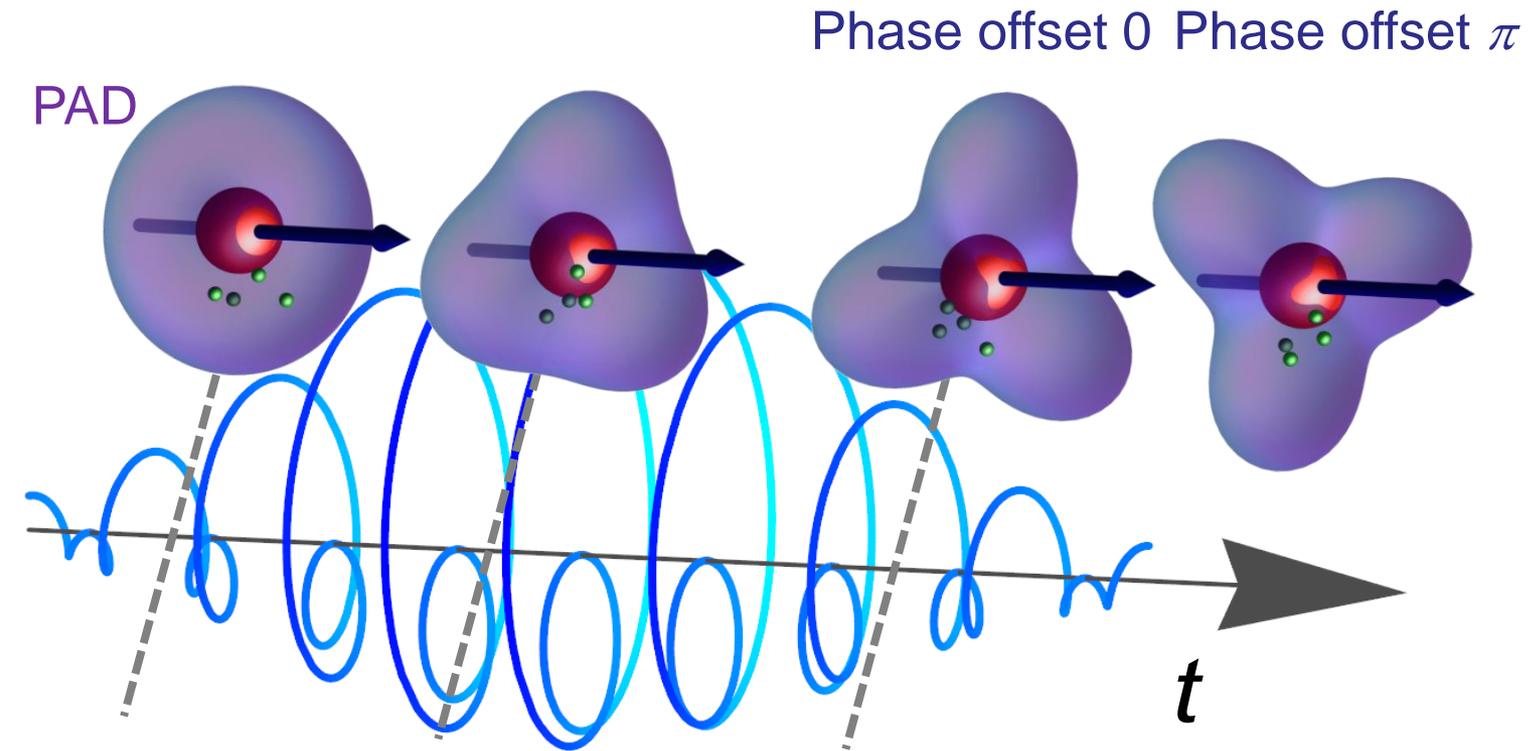
n=10 ~ 4 fs



Formation of the asymmetry



Formation of the asymmetry



Electric strength

Pulse parameters: отношение гармоник

$$\vec{E}(t) = \vec{\varepsilon} E_0(t) (\cos \omega t + \eta \cos(2\omega t + \varphi))$$

Polarization (определяет симметрию)

Relative phase

Pulse duration

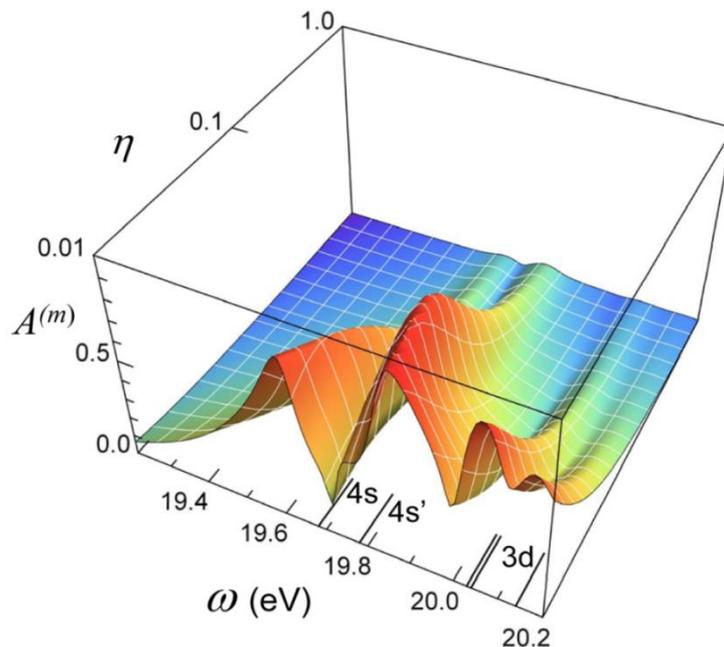
Intensity

Form

envelope

Ratio of first and second harmonics

(определяет эффективность интерференции)



$$I = 10^{12} \text{ W/cm}^2$$

$$\eta = 0.03$$

Two-photon amplitude $\sim I$

Single photon amplitude $\sim I^{1/2}$

$\sqrt{I} / \eta = \text{const}$ Leads to the same asymmetry

Pulse parameters: фаза между гармониками

$$\vec{E}(t) = \vec{\varepsilon} E_0(t) (\cos \omega t + \eta \cos(2\omega t + \varphi))$$

Polarization (определяет симметрию)

Relative phase

Pulse duration
Intensity
Form

envelope

(контролирующий параметр)

Ratio of first and second harmonics

(определяет эффективность интерференции)

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \sigma_0 \left(1 + \underbrace{\sum_{2,4} \beta_k P_k(\cos \theta)}_{\text{Incoherent sum of single- and two-photon amplitudes}} + \underbrace{\sum_{1,3} \beta_k(\varphi) P_k(\cos \theta)}_{\text{Interference of single- and two-photon amplitudes}} \right)$$

Incoherent sum of single- and two-photon amplitudes

Interference of single- and two-photon amplitudes

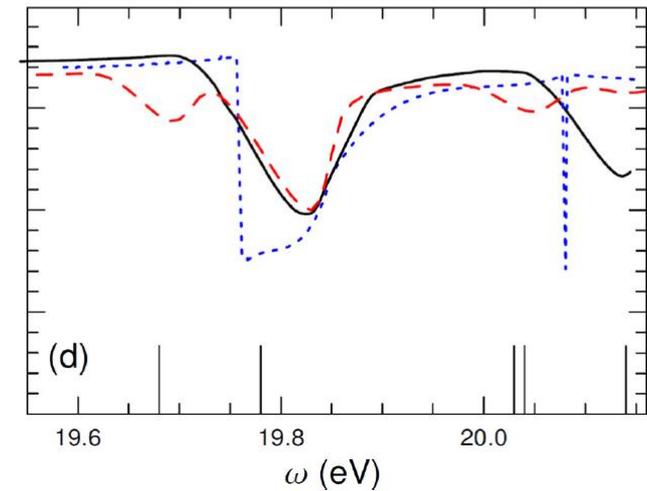
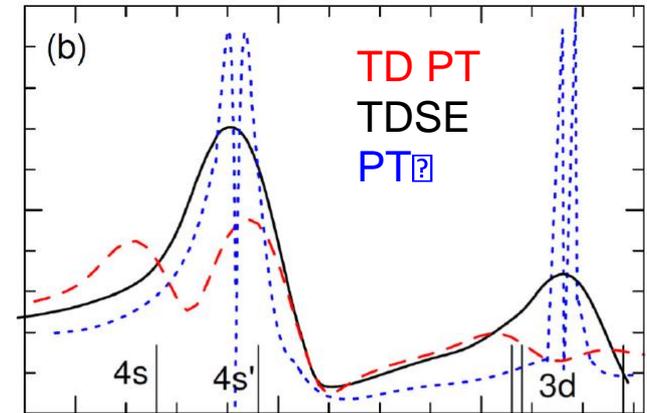
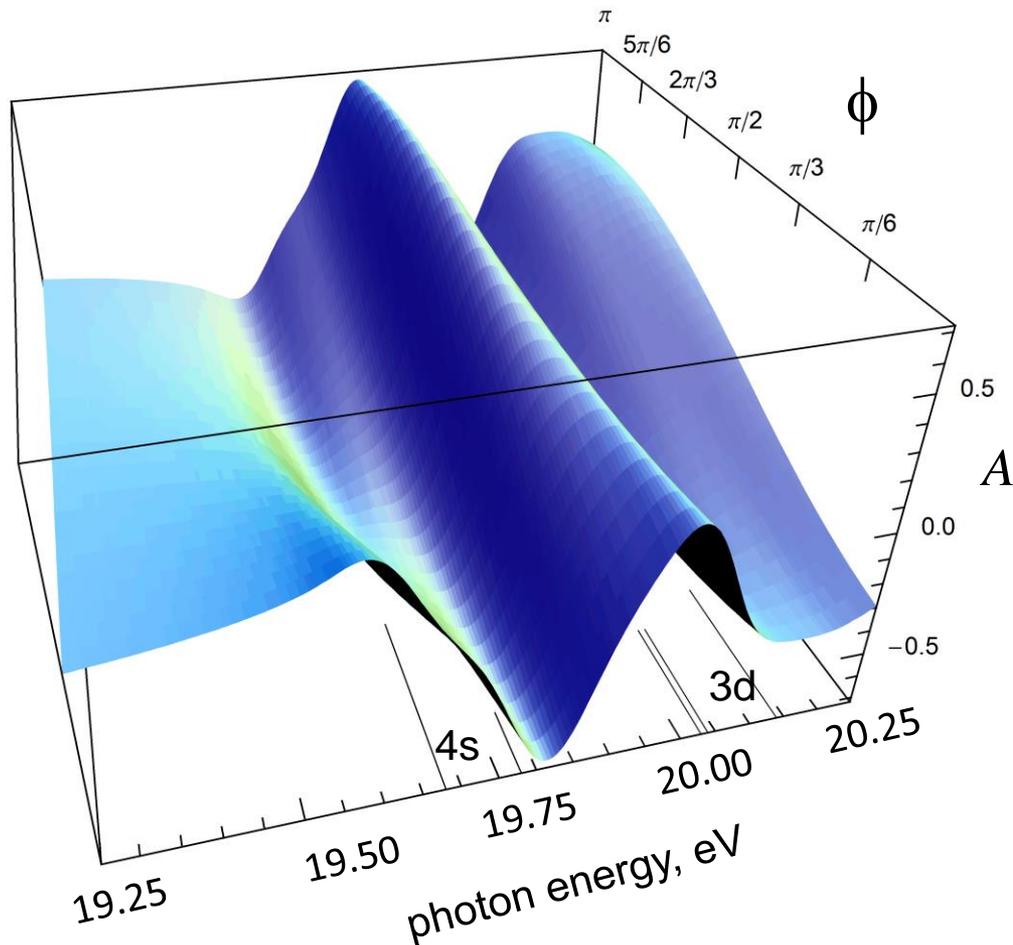
No dependency on phase between harmonics

Each parameter depends as $\cos(\varphi - \varphi_m)$

Форма углового распределения и величина поляризации спина являются контролируемыми величинами

Максимальная асимметрия и фаза

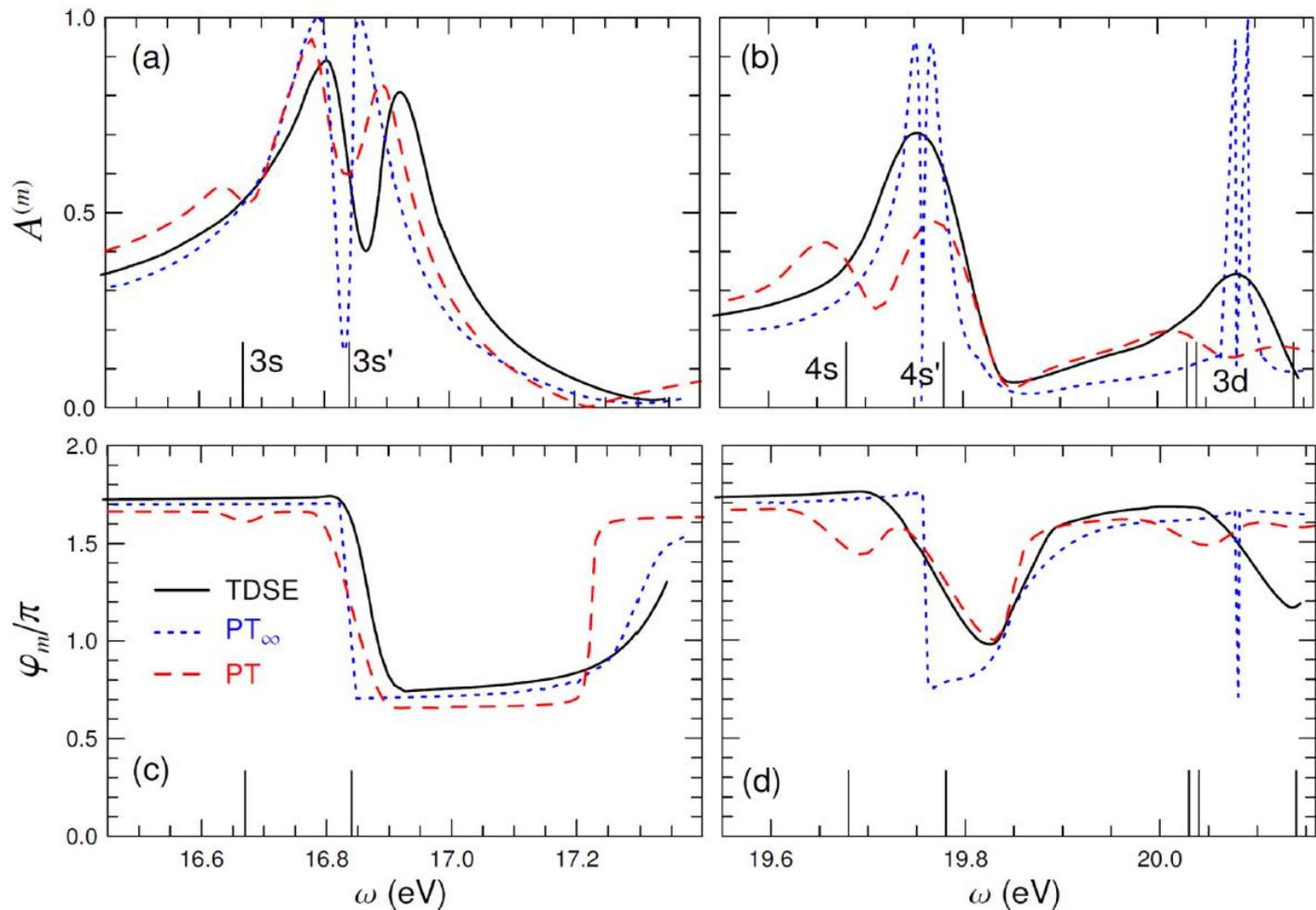
10^{12} W/cm²; $\eta=0.02$; $N=250$



Интерференционные члены ведут себя как $\cos(\phi - \phi)$

Максимальная асимметрия и фаза

10^{12} W/cm²; $\eta=0.1$; $N=500$



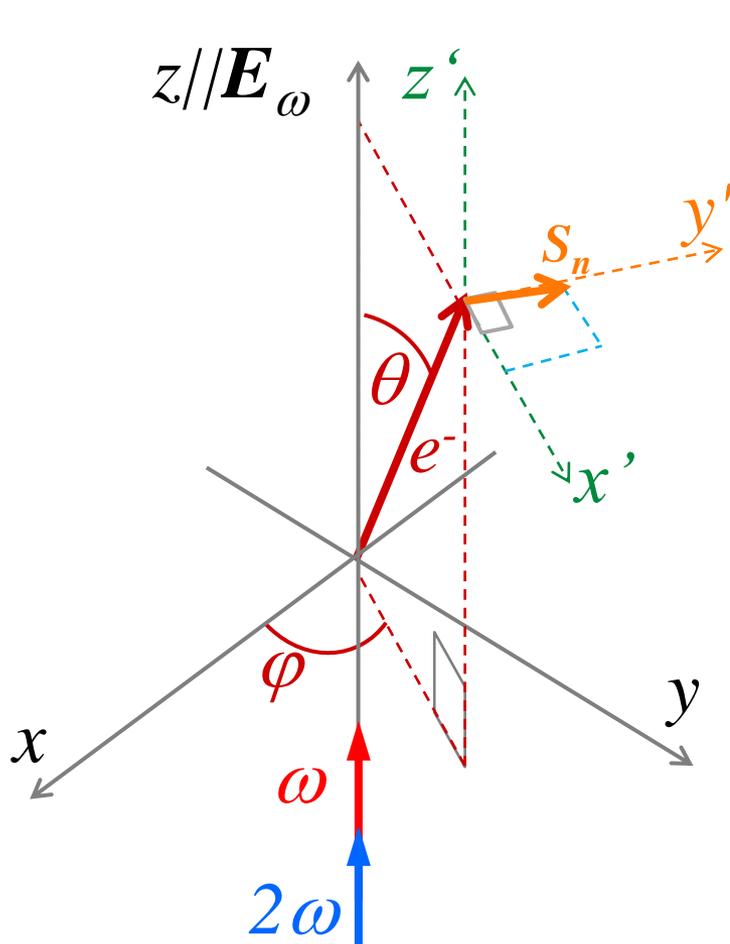
Интерференционные члены ведут себя как $\cos(\phi-\phi)$

Outline

Цель - исследовать как контролировать и управлять вероятностью и направлением электронной эмиссии и поляризации спина электрона, изменяя параметры и бихроматических полей, генерируемых современными ЛСЭ.

- ❑ Введение: Схема процесса и первые эксперименты
- ❑ Симметрии поля и угловых распределений
- ❑ Метод
- ❑ Управляющие(контролирующие) параметры
- ❑ **Поляризация спина фотоэлектрона**
- ❑ **Возможность определить параметры излучения**

Ionization by linearly polarized field



Spin polarization

$$P_n = \frac{W(\mathcal{J}, \varphi, 1/2) - W(\mathcal{J}, \varphi, -1/2)}{W(\mathcal{J}, \varphi, 1/2) + W(\mathcal{J}, \varphi, -1/2)}$$

P_n Is perpendicular to the plane spanned by polarization vector of the field and the direction of emission

Conventional one-photon ionization

$$P_n = p_{2n} \sin \mathcal{J} \cos \mathcal{J} \rightarrow 0$$

Conventional two-photon ionization

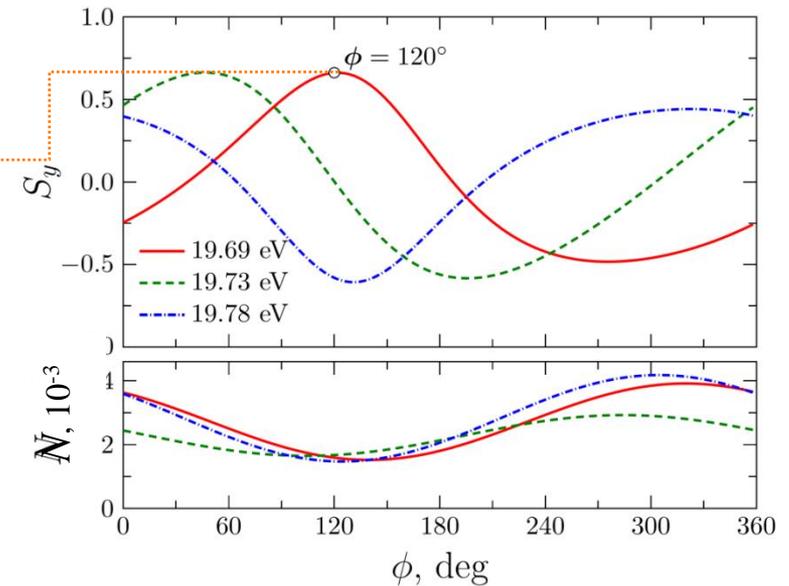
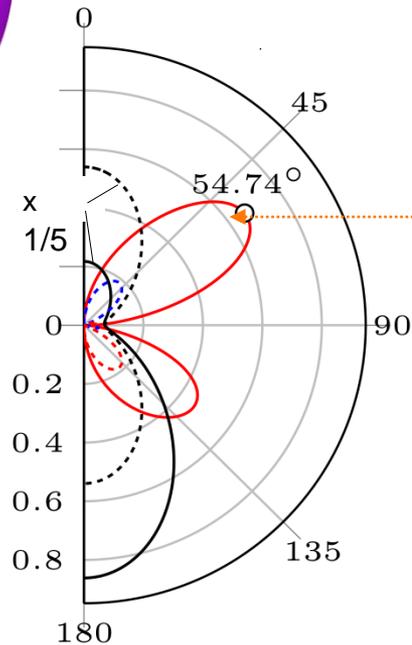
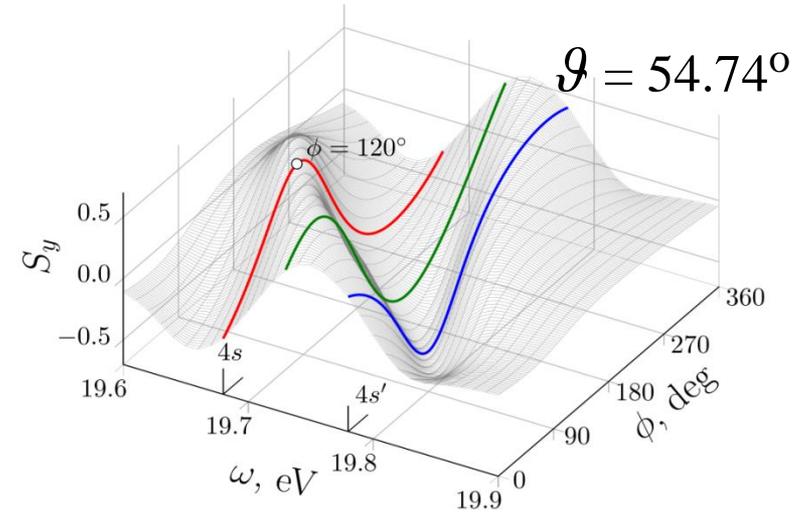
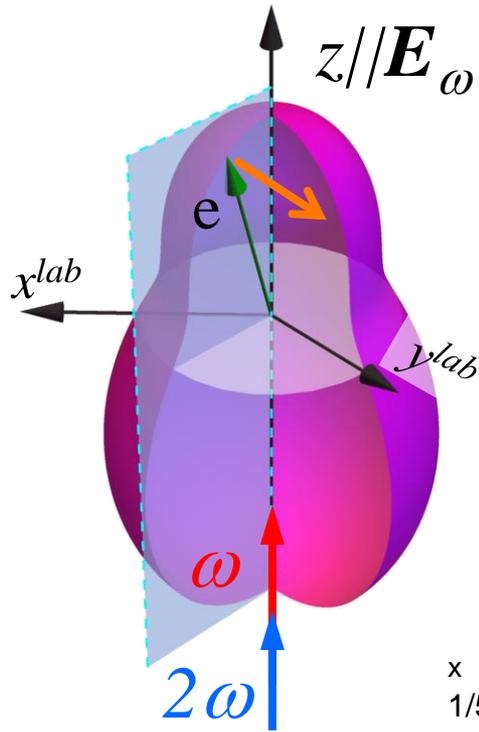
$$P_n = p_{2n} \sin \mathcal{J} \cos \mathcal{J} + p_{4n} \sin \mathcal{J} \cos^3 \mathcal{J}$$

Coherent bichromatic ionization

$$P_n = p_{1n} \sin \mathcal{J} + p_{3n} \sin \mathcal{J} \cos^2 \mathcal{J}$$

Ionization by linearly polarized field

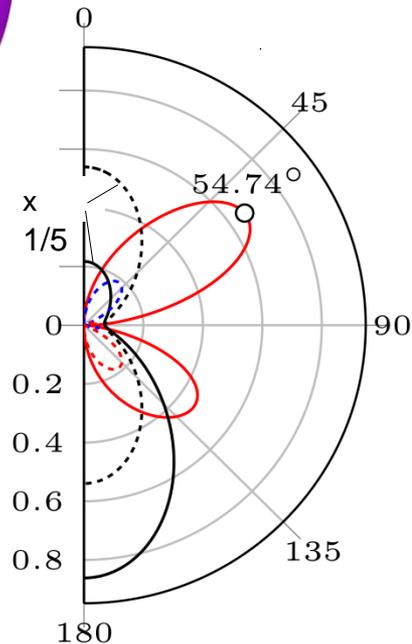
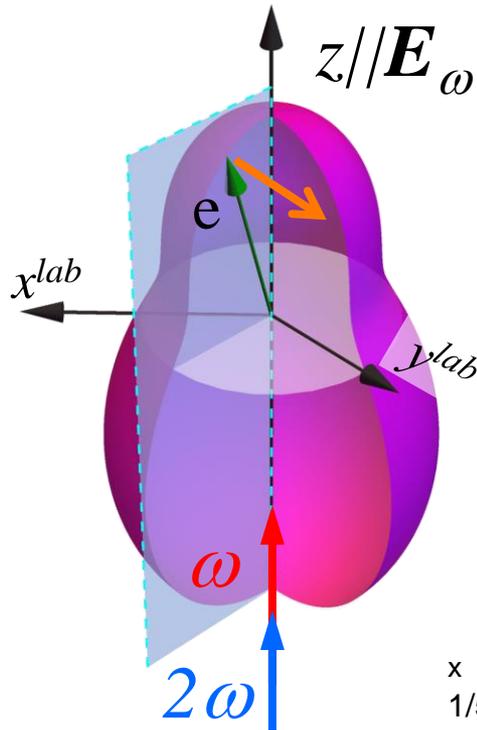
Neon at $\omega = 19.69$ eV, $I = 10^{12}$ W/cm², $\eta = 0.03$



Red $m_s > 0$
Blue $m_s < 0$

Ionization by linearly polarized field

Neon at $\omega = 19.69$ eV, $I = 10^{12}$ W/cm², $\eta = 0.03$



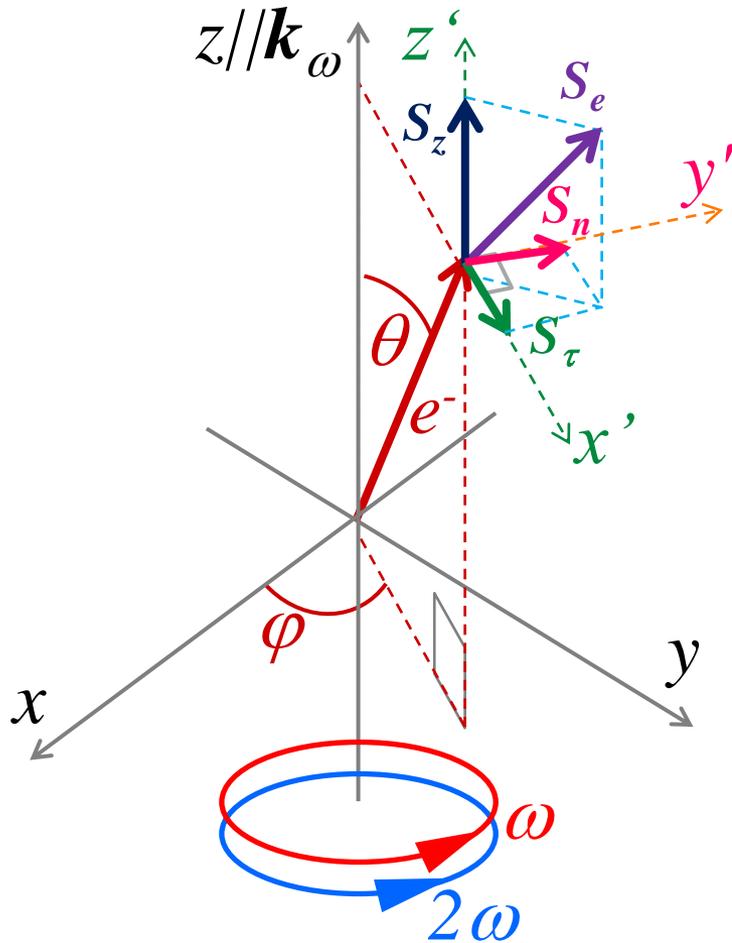
□ Значительное (с 0.2 до 0.7) увеличение поляризации спина

□ Электроны, испущенные перпендикулярно поляризации могут быть поляризованы

□ Пара детекторов, размещенных симметрично позволяет исключить некогерентный вклад

Red $m_s > 0$
Blue $m_s < 0$

Ionization by circularly polarized field

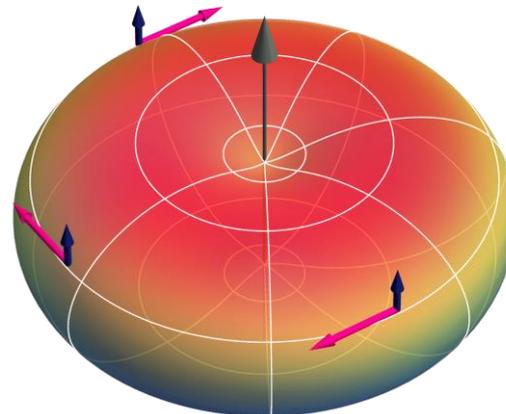


$$P_n = \frac{W(\mathcal{G}, \varphi, 1/2) - W(\mathcal{G}, \varphi, -1/2)}{W(\mathcal{G}, \varphi, 1/2) + W(\mathcal{G}, \varphi, -1/2)}$$

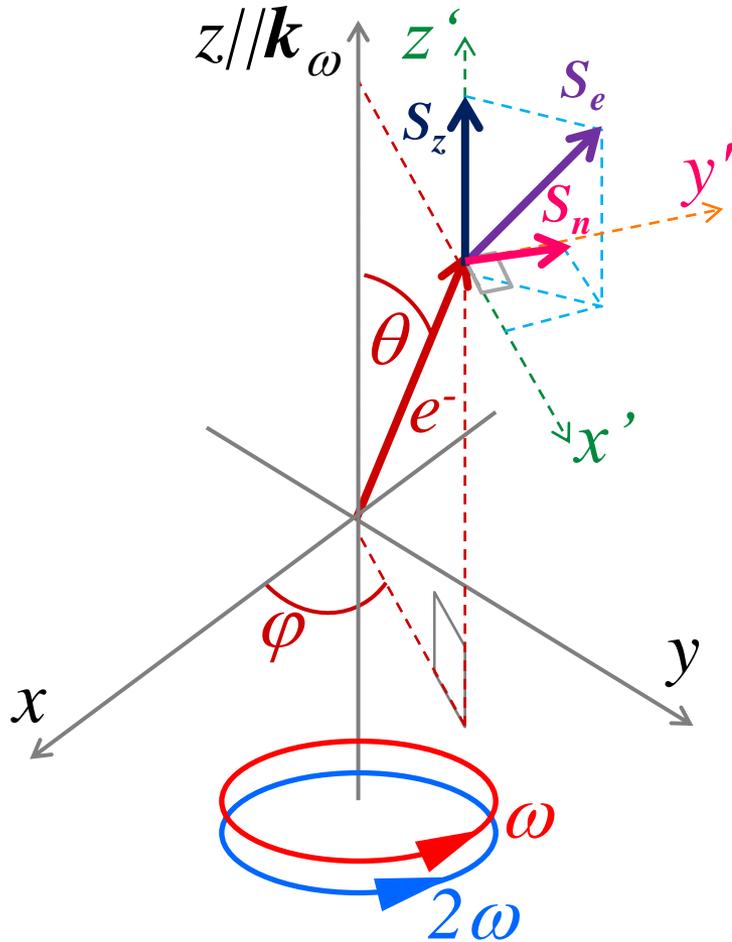
P_z Along the photon beam propagation

P_τ Along projection of the emission direction on the xy plane

P_n Perpendicular to the plane spanned by the photon beam propagation direction and the direction of emission



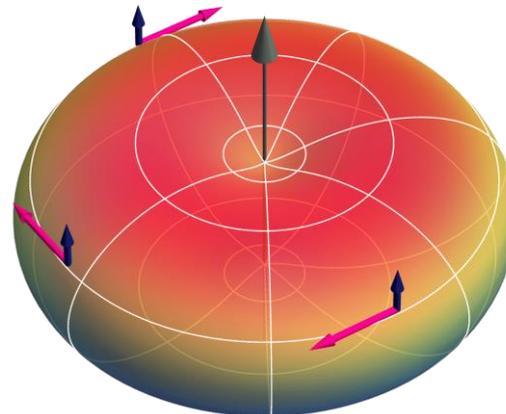
Ionization by circularly polarized field



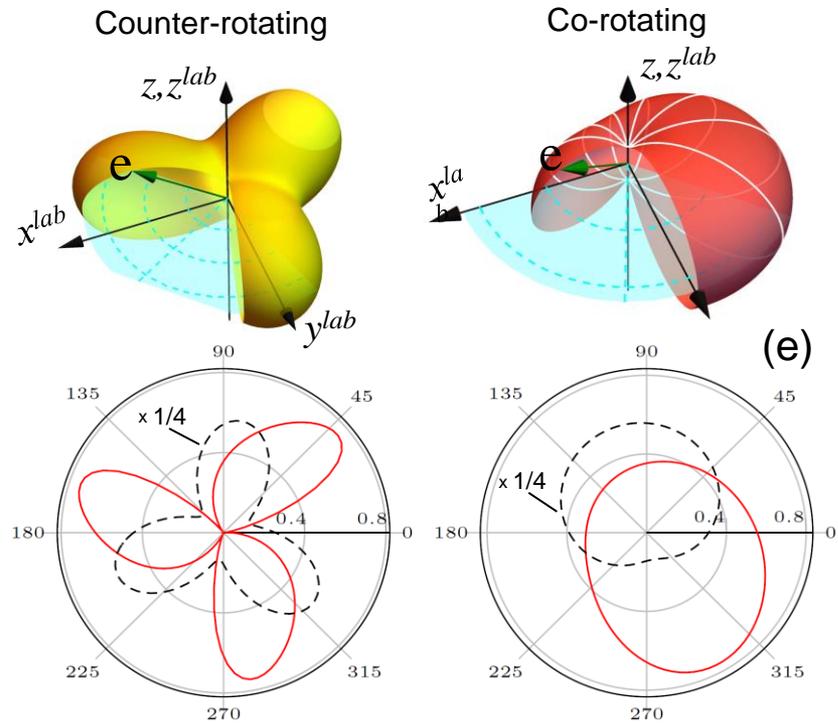
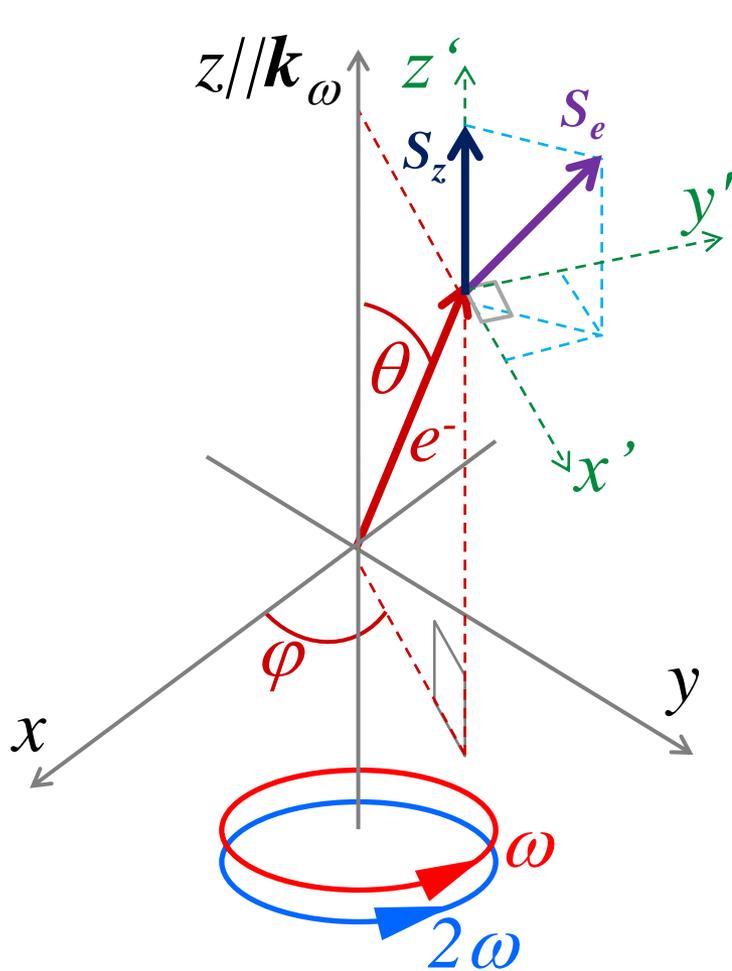
$$P_n = \frac{W(\mathcal{G}, \varphi, 1/2) - W(\mathcal{G}, \varphi, -1/2)}{W(\mathcal{G}, \varphi, 1/2) + W(\mathcal{G}, \varphi, -1/2)}$$

P_z Along the photon beam propagation

P_n Perpendicular to the plane spanned by the photon beam propagation direction and the direction of emission



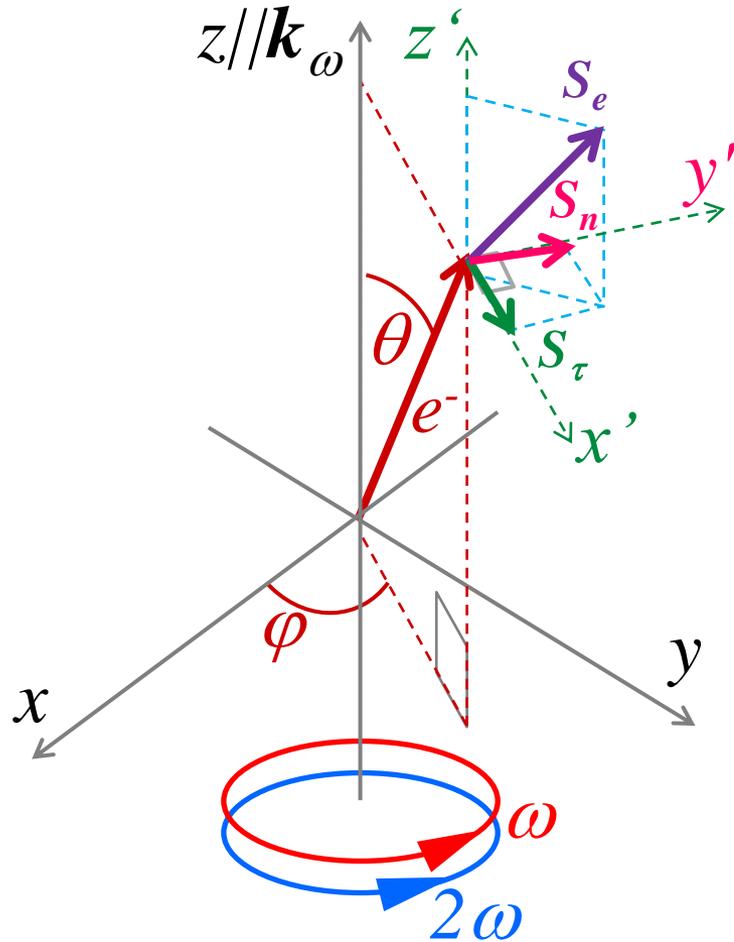
Ionization by circularly polarized field



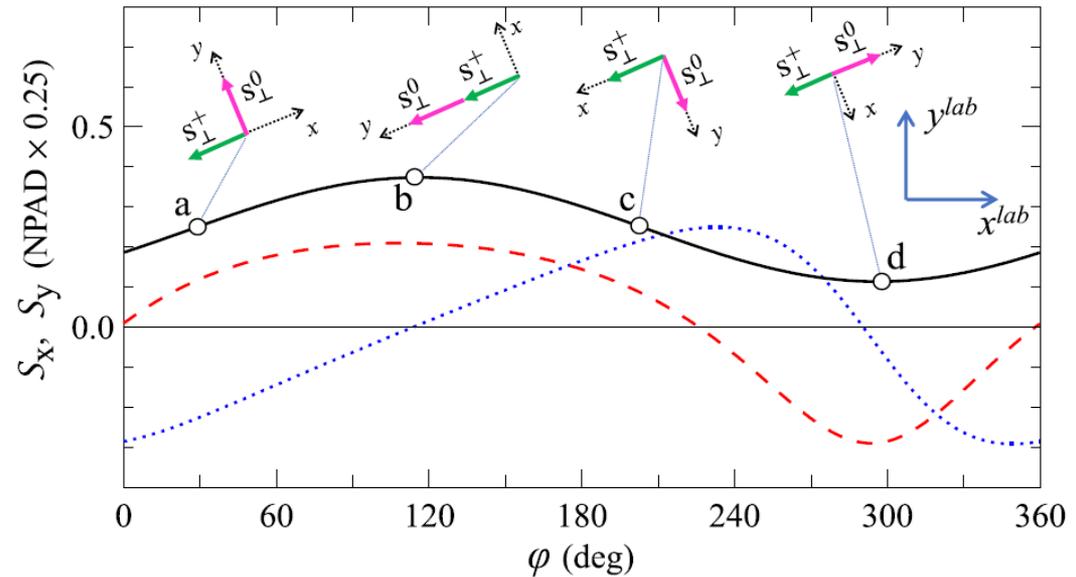
□ Значительное (с 0.4 до 0.8) увеличение поляризации спина

□ Максимальный интерференционный вклад в P_z достигается при $\theta = \pi/2$, то есть в области максимального сечения

Ionization by circularly polarized field



Одинаковые спиральности



□ Интерференционный вклад в поляризацию спина в плоскости xu ориентирован в одном направлении и не зависит от φ ,

Outline

Цель - исследовать как контролировать и управлять вероятностью и направлением электронной эмиссии и поляризации спина электрона, изменяя параметры и бихроматических полей, генерируемых современными ЛСЭ.

- ❑ Введение: Схема процесса и первые эксперименты
- ❑ Симметрии поля и угловых распределений
- ❑ Метод
- ❑ Управляющие(контролирующие) параметры
- ❑ Поляризация спина фотоэлектрона
- ❑ **Возможность определить параметры излучения**

Определение параметров излучения

Complete characterization of phase and amplitude of bichromatic XUV light
Phys. Rev. Lett. **123**, 213904 (2019)

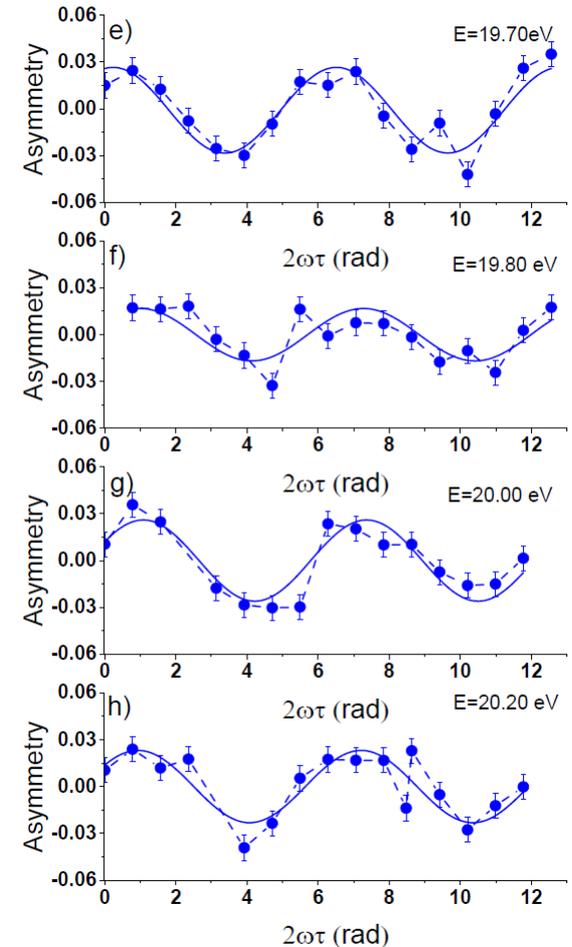
$$\beta_1 = h \times \frac{4\sqrt{15}c_d c_p \cos(-\eta_d + \eta_p + \phi) + 10\sqrt{3}c_p c_s \cos(\eta_p - \eta_s + \phi)}{5(c_d^2 + c_p^2 + c_s^2)},$$

$$\beta_2 = \frac{10c_d^2 + 14\sqrt{5}c_d c_s \cos(\eta_d - \eta_s) + 14c_p^2}{7(c_d^2 + c_p^2 + c_s^2)},$$

$$\beta_3 = h \times \frac{6\sqrt{15}c_d c_p \cos(-\eta_d + \eta_p + \phi)}{5(c_d^2 + c_p^2 + c_s^2)} \equiv [\beta_3]_0 \cos[\phi' - (\phi_0 + \eta_d - \eta_p)],$$

$$\beta_4 = \frac{18c_d^2}{7(c_d^2 + c_p^2 + c_s^2)},$$

$$\beta_1 - \frac{2}{3}\beta_3 = h \times \frac{2\sqrt{3}c_p c_s \cos(\eta_p - \eta_s + \phi)}{c_d^2 + c_p^2 + c_s^2} \equiv \left[\beta_1 - \frac{2}{3}\beta_3 \right]_0 \cos[\phi' - (\phi_0 - \eta_p + \eta_s)].$$



Дальнейшее развитие

- ❑ Исследовать роль эволюции промежуточных и конечных состояний (автоионизация, деполяризация)
- ❑ Исследовать другие геометрии (скрещенные линейные поляризации)
- ❑ Исследовать эффекты сильного поля (более высокие порядки теории возмущений)
- ❑ Рассмотреть мишени без сферической симметрии (молекулы)