Когерентный (фазовый) контроль над фотоэмиссией в двухчастотной ионизации

Попова Мария Михайловна

Физический факультет МГУ, аспирантка 4 года

8 декабря 2022

План доклада

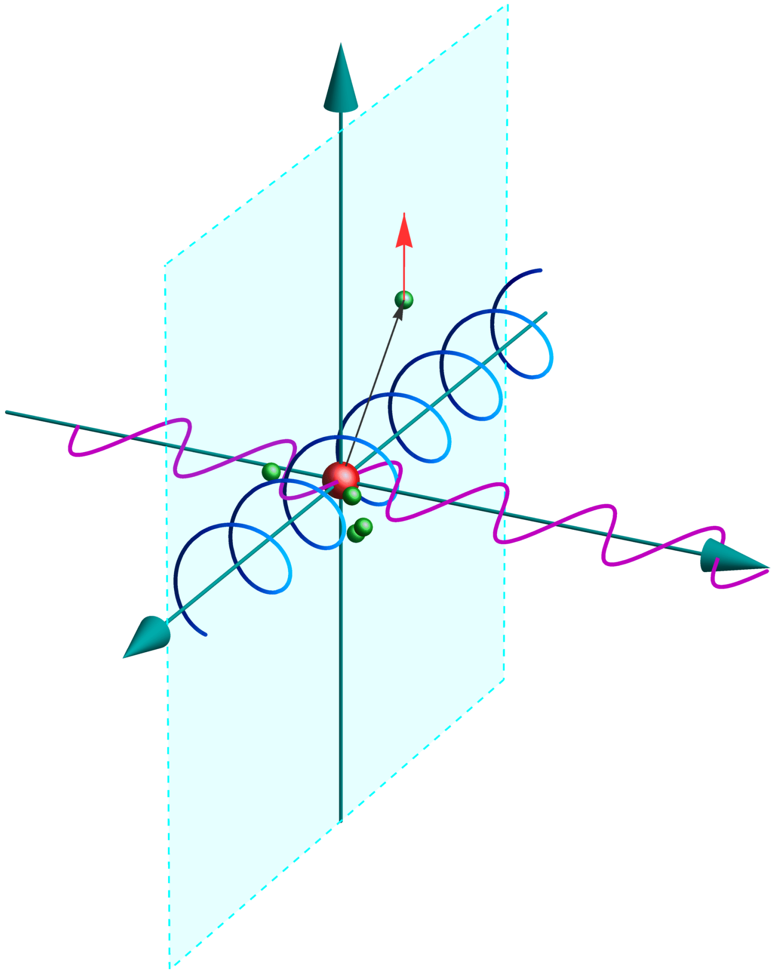
- Цель работы

- Общая теория

- Задача когерентного контроля (w+2w)

- Задача RABBITT-спектроскопии (w+13w+15w+17w)

Цель

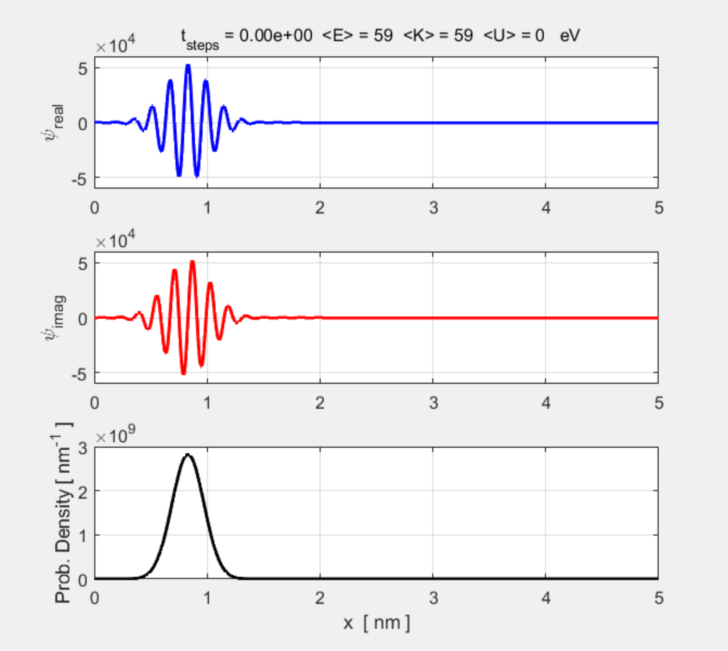


- Разработка теоретического подхода к описанию полихроматической ионизации nω+mω VUV-полями произвольной поляризации.
- Применение развитого подхода для описания имеющихся экспериментальных данных.
- Применение развитого подхода для планирования будущих экспериментов.

План доклада

- Цель работы
- Общая теория
- Задача когерентного контроля (w+2w)
- Задача RABBITT-спектроскопии (w+13w+15w+17w)

Формализм статистических тензоров



d-arora.github.io/Doing-Physics-With-Matlab/mpDocs/se_fdtdA.htm

матрица плотности электрона

$$\langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle = \frac{W}{2} \begin{pmatrix} 1 + P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1 - P_z \end{pmatrix}$$

статистический тензор электрона

$$\boxed{\rho_{k_s q_s} = \sum_{m_s m_s'} (-1)^{\frac{1}{2} - m_s'} (\tfrac{1}{2} m_s, \tfrac{1}{2} - m_s' \,|\, k_s q_s) \langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle}$$

угловое распределение и спиновая поляризация

after some angular momentum algebra:

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{k_{l,\gamma} q_{l,\gamma}} B_{k_l k_s k_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') \rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') (k_l q_l, k_s q_s \,|\, k_\gamma q_\gamma) Y_{k_l q_l}(\vartheta, \varphi)$$

$$W = \sqrt{2} \rho_{00}$$

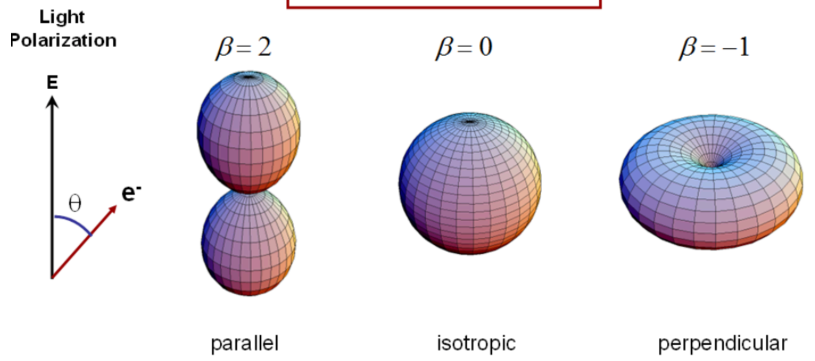
$$P_z = \rho_{10} / \rho_{00}$$

$$P_x = -(\rho_{11} - \rho_{1-1}) / (\sqrt{2}\, \rho_{00})$$

$$P_y = -i(\rho_{11} + \rho_{1-1}) / (\sqrt{2}\, \rho_{00})$$

Формализм статистических тензоров

$$f(\theta) = 1 + \beta\left(\frac{3}{2}\cos^2\theta - \frac{1}{2}\right)$$



cluster.physik.uni-freiburg.de/topics_Wavefunction_character

матрица плотности электрона

$$\langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle = \frac{W}{2} \begin{pmatrix} 1 + P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1 - P_z \end{pmatrix}$$

статистический тензор электрона

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{m_s m_s'} (-1)^{\frac{1}{2} - m_s'} (\tfrac{1}{2} m_s, \tfrac{1}{2} - m_s' \,|\, k_s q_s) \langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle$$

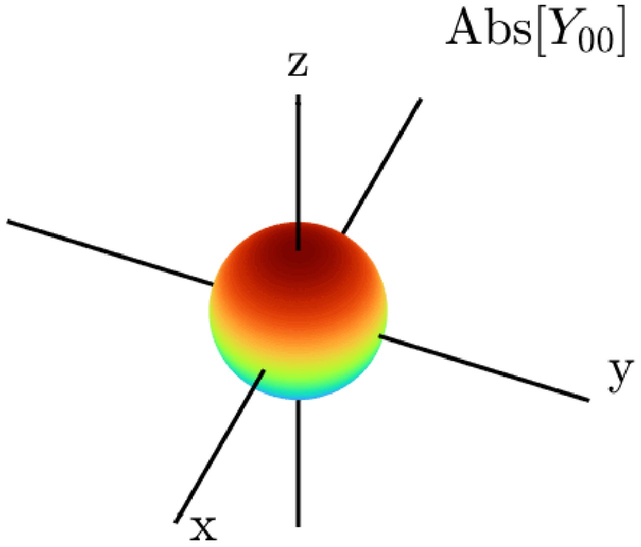
after some angular momentum algebra:

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{k_{l,\gamma} q_{l,\gamma}} B_{k_l k_s k_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') \rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') (k_l q_l, k_s q_s \,|\, k_\gamma q_\gamma) Y_{k_l q_l}(\vartheta, \varphi)$$

угловое распределение и спиновая поляризация

$$\boxed{\begin{aligned} W &= \sqrt{2}\rho_{00} \\ P_z &= \rho_{10}/\rho_{00} \\ P_x &= -(\rho_{11} - \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00}) \\ P_y &= -i(\rho_{11} + \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00}) \end{aligned}}$$

Формализм статистических тензоров



матрица плотности электрона

$$\langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle = \frac{W}{2} \begin{pmatrix} 1+P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1-P_z \end{pmatrix}$$

статистический тензор электрона

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{m_s m_s'} (-1)^{\frac{1}{2}-m_s'} (\tfrac{1}{2} m_s, \tfrac{1}{2} - m_s' \,|\, k_s q_s) \langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle$$

угловое распределение и спиновая поляризация

after some angular momentum algebra:

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{k_{l,\gamma} q_{l,\gamma}} B_{k_l k_s k_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') \rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') (k_l q_l, k_s q_s \,|\, k_\gamma q_\gamma) \boxed{Y_{k_l q_l}(\vartheta, \varphi)}$$

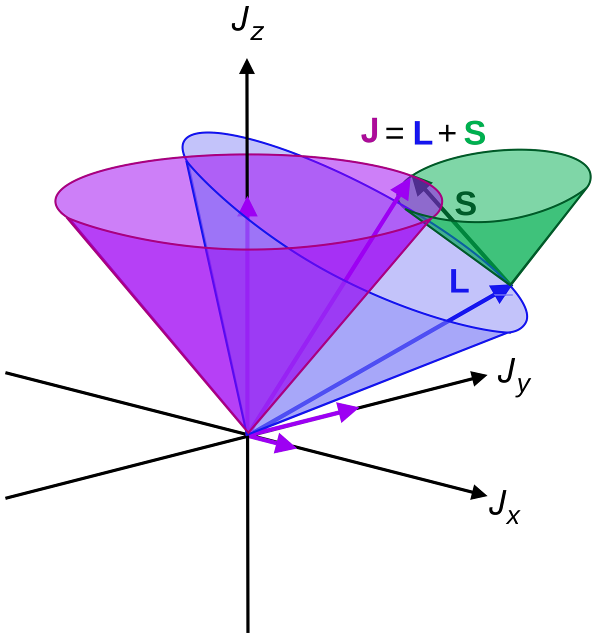
$$W = \sqrt{2}\rho_{00}$$

$$P_z = \rho_{10}/\rho_{00}$$

$$P_x = -(\rho_{11} - \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00})$$

$$P_y = -i(\rho_{11} + \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00})$$

Формализм статистических тензоров



en.wikipedia.org/wiki/
Angular_momentum_operator

матрица плотности электрона

$$\langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle = \frac{W}{2} \begin{pmatrix} 1+P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1 - P_z \end{pmatrix}$$

статистический тензор электрона

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{m_s m_s'} (-1)^{\frac{1}{2} - m_s'} (\tfrac{1}{2} m_s, \tfrac{1}{2} - m_s' \,|\, k_s q_s) \langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle$$

угловое распределение и спиновая поляризация

$$W = \sqrt{2} \rho_{00}$$

$$P_z = \rho_{10} / \rho_{00}$$

$$P_x = -(\rho_{11} - \rho_{1-1}) / (\sqrt{2}\, \rho_{00})$$

$$P_y = -i(\rho_{11} + \rho_{1-1}) / (\sqrt{2}\, \rho_{00})$$

after some angular momentum algebra:

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{k_{l,\gamma} q_{l,\gamma}} B_{k_l k_s k_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') \rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') \boxed{(k_l q_l, k_s q_s \,|\, k_\gamma q_\gamma)} Y_{k_l q_l}(\vartheta, \varphi)$$

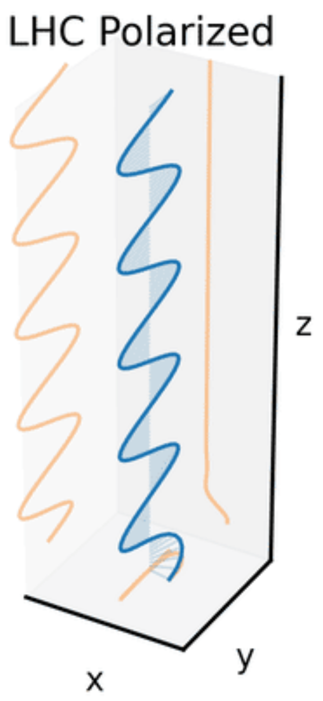
Формализм статистических тензоров

матрица плотности электрона

$$\langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle = \frac{W}{2} \begin{pmatrix} 1+P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1 - P_z \end{pmatrix}$$

статистический тензор электрона

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{m_s m_s'} (-1)^{\frac{1}{2} - m_s'} (\tfrac{1}{2} m_s, \tfrac{1}{2} - m_s' \,|\, k_s q_s) \langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle$$



en.wikipedia.org/wiki/
Polarization_(waves)

after some angular momentum algebra:

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{k_{l,\gamma} q_{l,\gamma}} B_{k_l k_s k_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') \boxed{\rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma')} (k_l q_l, k_s q_s \,|\, k_\gamma q_\gamma) Y_{k_l q_l}(\vartheta, \varphi)$$

угловое распределение и спиновая поляризация

$$W = \sqrt{2}\rho_{00}$$

$$P_z = \rho_{10}/\rho_{00}$$

$$P_x = -(\rho_{11} - \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00})$$

$$P_y = -i(\rho_{11} + \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00})$$

Статистический тензор фотона

$$\boldsymbol{p}_\gamma = \sum_\lambda e_\gamma^\lambda \boldsymbol{n}_\lambda$$

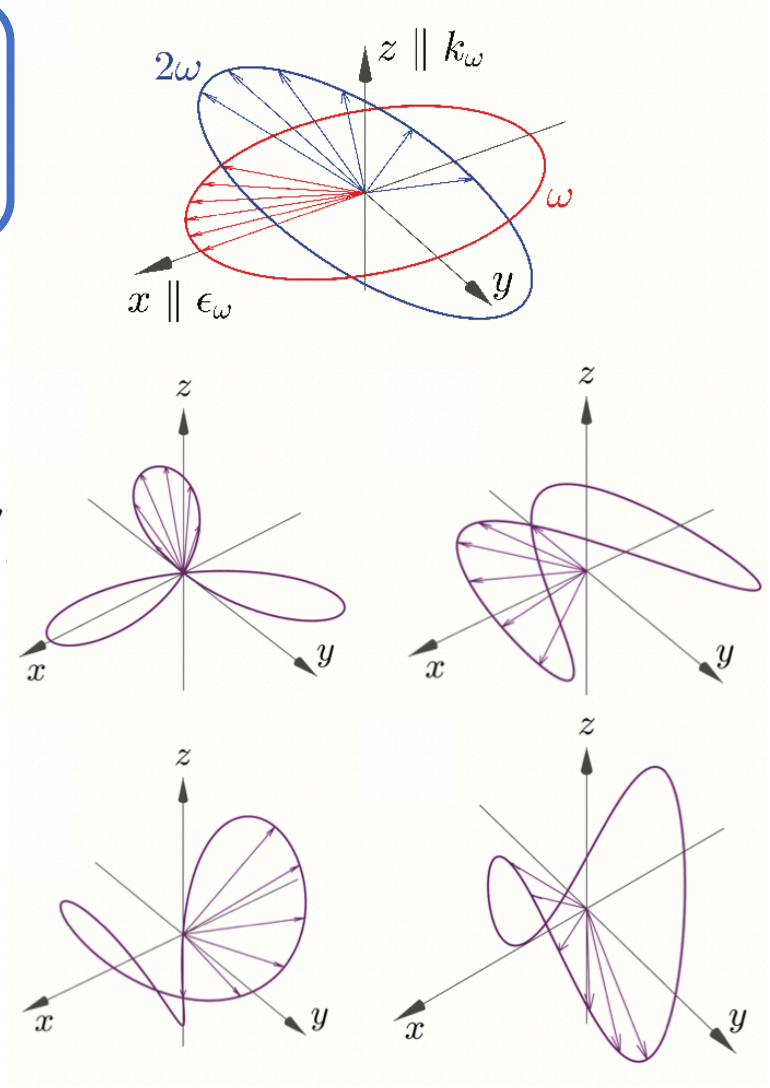
один фотон

$$\langle \mathbf{k}\lambda \,|\, \rho \,|\, \mathbf{k}\lambda' \rangle = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+P_3 & -P_1+iP_2 \\ -P_1-iP_2 & 1-P_3 \end{pmatrix}$$

$$|\gamma\rangle = \sum_\lambda e_\gamma^\lambda |1\lambda\rangle$$

$$|2\gamma\rangle = \sum_{M_\gamma \lambda\lambda'} e_\gamma^\lambda e_\gamma^{\lambda'} (1\lambda, 1\lambda' \,|\, J_\gamma M_\gamma) |1\lambda\rangle |1\lambda'\rangle$$

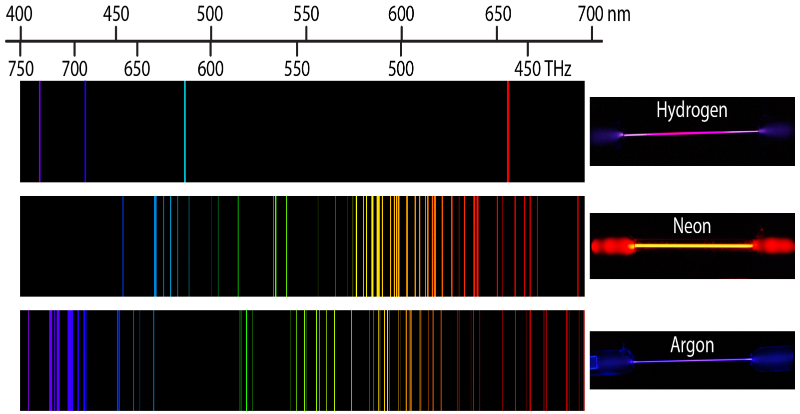
$$|3\gamma\rangle = \sum_{M_\gamma m_\gamma \lambda\lambda'\lambda''} e_\gamma^\lambda e_\gamma^{\lambda'} e_\gamma^{\lambda''} (1\lambda, 1\lambda' \,|\, J_{n\gamma} M_{n\gamma}) (J_{n\gamma} M_{n\gamma}, 1\lambda' \,|\, J_\gamma M_\gamma) |1\lambda\rangle |1\lambda'\rangle |1\lambda''$$



$$\rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J'_\gamma) = \sum_{M_\gamma M'_\gamma} (-1)^{J'_\gamma - M'_\gamma} (J_\gamma M_\gamma, J'_\gamma - M'_\gamma \,|\, k_\gamma q_\gamma)$$

$$\langle J_\gamma M_\gamma | \, m\gamma + n\gamma \,\rangle \langle \, m\gamma + n\gamma \,| J'_\gamma M'_\gamma \rangle \,.$$

Формализм статистических тензоров



wisc.pb.unizin.org/chem109fall2021ver02/chapter/atomic-spectra/

матрица плотности электрона

$$\langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle = \frac{W}{2} \begin{pmatrix} 1 + P_z & P_x - iP_y \\ P_x + iP_y & 1 - P_z \end{pmatrix}$$

статистический тензор электрона

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{m_s m_s'} (-1)^{\frac{1}{2} - m_s'} (\tfrac{1}{2} m_s, \tfrac{1}{2} - m_s' \,|\, k_s q_s) \langle \tfrac{1}{2} m_s \,|\, \rho \,|\, \tfrac{1}{2} m_s' \rangle$$

угловое распределение и спиновая поляризация

$$W = \sqrt{2}\rho_{00}$$

$$P_z = \rho_{10}/\rho_{00}$$

$$P_x = -(\rho_{11} - \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00})$$

$$P_y = -i(\rho_{11} + \rho_{1-1})/(\sqrt{2}\,\rho_{00})$$

after some angular momentum algebra:

$$\rho_{k_s q_s} = \sum_{k_{l,\gamma} q_{l,\gamma}} \boxed{B_{k_l k_s k_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma')} \rho_{k_\gamma q_\gamma}(J_\gamma, J_\gamma') (k_l q_l, k_s q_s \,|\, k_\gamma q_\gamma) Y_{k_l q_l}(\vartheta, \varphi)$$

Расчет матричных элементов перехода

$$i\,\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\boldsymbol{r},t)=\left(\hat{H}_{\rm at}+\hat{H}_{\rm int}(t)\right)\Psi(\boldsymbol{r},t).$$

$$\hat{H}_{\rm at}\varphi_{n,\varepsilon}(\boldsymbol{r})=E_{n,\varepsilon}\varphi_{n,\varepsilon}(\boldsymbol{r}),$$

$$\Psi(\boldsymbol{r},t)=\sum_n a_n(t)\varphi_n(\boldsymbol{r})e^{-iE_nt}+\int d\varepsilon\, a_\varepsilon(t)\varphi_\varepsilon(\boldsymbol{r})e^{-iE_\varepsilon t}$$

$$\frac{da_f(t)}{dt}=-i\sum_i\!\!\!\!\int e^{i(\varepsilon_f-\varepsilon_i)t}\langle\varphi_f\,|\,\hat{H}_{\rm int}(t)\,|\,\varphi_i\rangle\,a_i(t)$$

Решение системы скоростных уравнений (РСУ)

+: автоматический учет эффектов сильного поля

-: ресурсоемкость

Переход к теории возмущений (ТВ)

$$a_f(t)=a_f^{(0)}(t)+a_f^{(1)}(t)+a_f^{(2)}(t)+\dots$$

$$a_f^{(0)}(t)\;=\;\delta_{fi}$$

$$\frac{da_f^{(1)}(t)}{dt}\;=\;-ie^{i(\varepsilon_f-\varepsilon_i)t}\langle\varphi_f\,|\,\hat{H}_{\rm int}(t)\,|\,\varphi_i\rangle$$

$$\frac{da_f^{(2)}(t)}{dt}=-i\sum_n\!\!\!\!\int e^{i(\varepsilon_f-\varepsilon_n)t}\boxed{\langle\phi_k\,|\,\hat{H}_{\rm int}(t)\,|\,\phi_n\rangle}\,a_n^{(1)}(t)$$

итд

Матричный элемент факторизуется на зависящую от времени и зависящую от мишени части

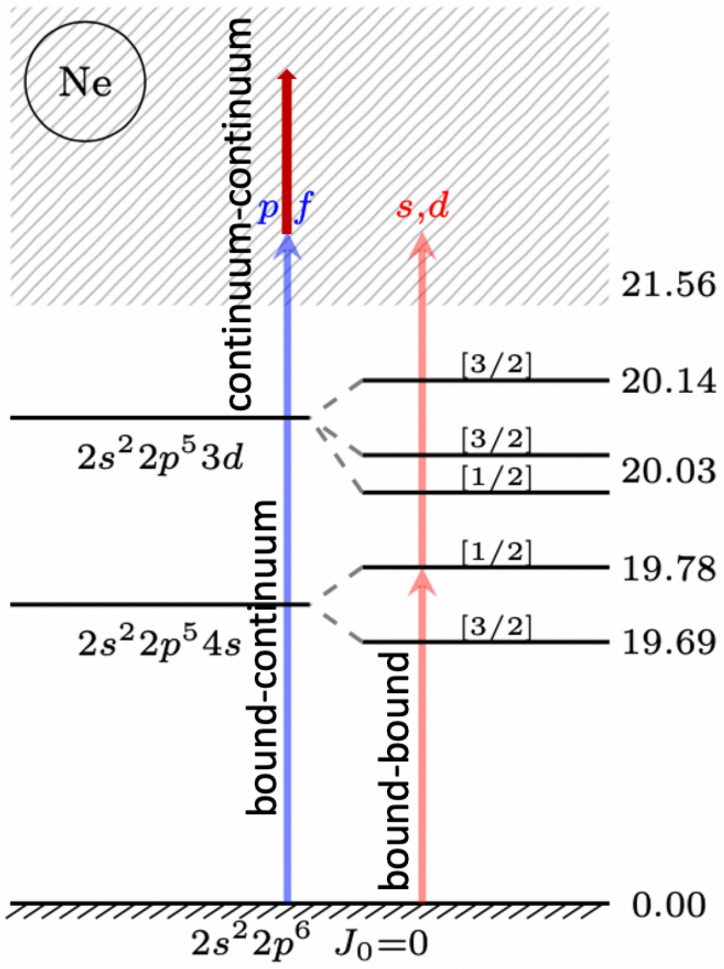
$$\langle\phi_f|\hat{H}_{\rm int}|\phi_i\rangle=\langle\phi_f|D|\phi_i\rangle\cdot\int A(t)e^{\pm i\omega t}dt$$

Расчет методами R-матрицы и MCHF

Расчет матричных элементов перехода

Oxidation states	N/A
Configuration	[He] $2s^2$ $2p^6$
Expanded	$1s^2$ $2s^2$ $2p^6$
Energy levels	2, 8
НОАО	l=1, m=1, n=2

Дипольные переходы:
Однофотонные: s,d-волны
Двухфотонные: p,f-волны
Трехфотонные: s,d,g-волны



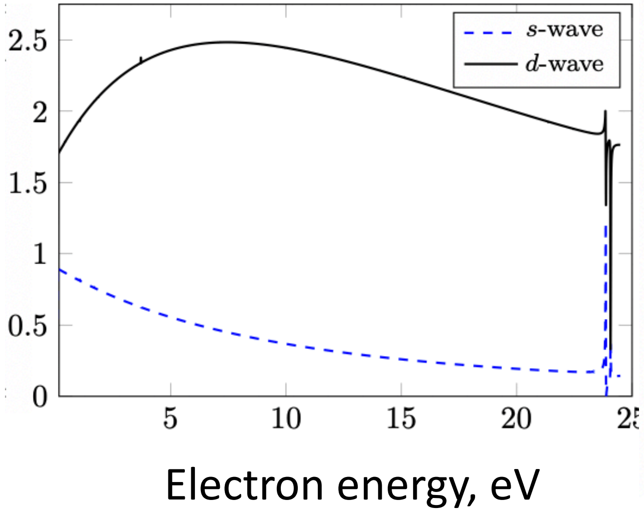
Расчет матричных элементов

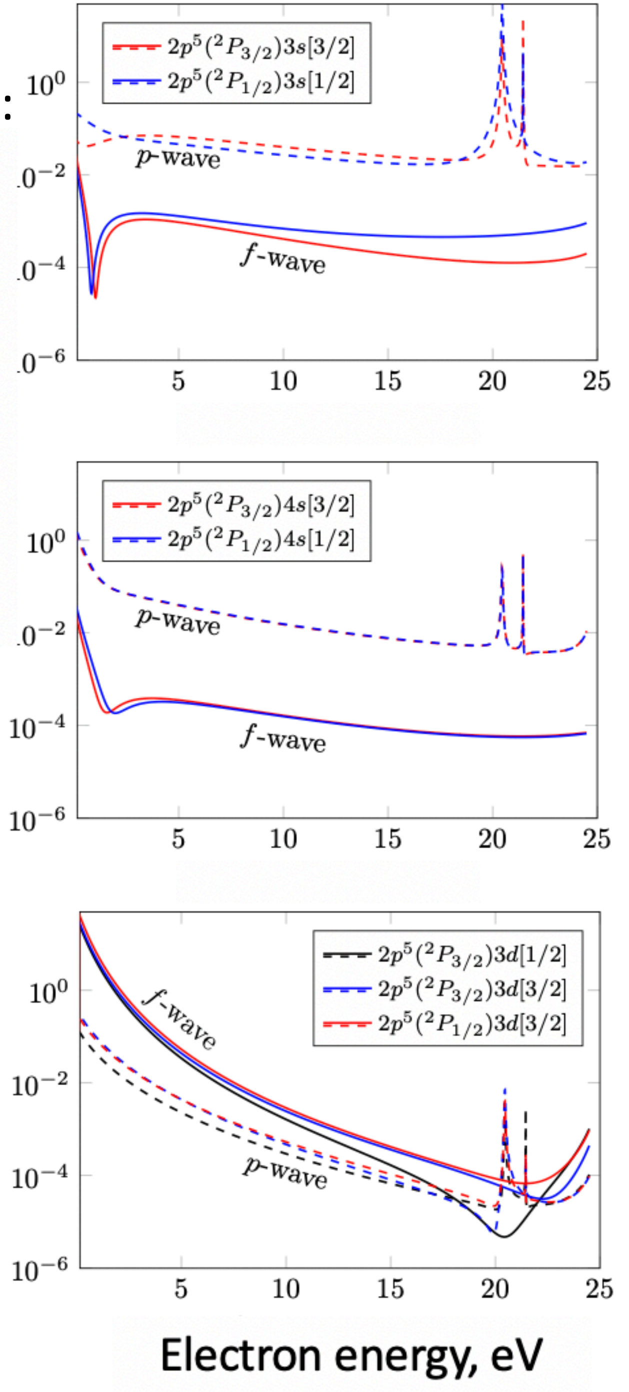
bound-bound (MCHF+R-матрица):

Состояние	E, эВ	RME	Лидирующие конфигурации
$2p^5(^2P_{3/2})3s[3/2]$	16.67	−0.25	$-0.92\|2p^53s\ ^3P\rangle - 0.39\|2p^53s\ ^1P\rangle$
$2p^5(^2P_{1/2})3s[1/2]$	16.85	0.60	$-0.38\|2p^53s\ ^3P\rangle + 0.92\|2p^53s\ ^1P\rangle$
$2p^5(^2P_{3/2})4s[3/2]$	19.69	−0.19	$-0.69\|2p^54s\ ^3P\rangle - 0.71\|2p^54s\ ^1P\rangle$
$2p^5(^2P_{1/2})4s[1/2]$	19.78	−0.18	$0.71\|2p^54s\ ^3P\rangle - 0.69\|2p^54s\ ^1P\rangle$
$2p^5(^2P_{3/2})3d[1/2]$	20.03	0.10	$0.89\|2p^53d\ ^3P\rangle - 0.43\|2p^53d\ ^1P\rangle - 0.12\|2p^53d\ ^3D\rangle$
$2p^5(^2P_{3/2})3d[3/2]$	20.04	−0.17	$0.27\|2p^53d\ ^3P\rangle + 0.72\|2p^53d\ ^1P\rangle - 0.64\|2p^53d\ ^3D\rangle$
$2p^5(^2P_{1/2})3d[3/2]$	20.14	0.13	$-0.36\|2p^53d\ ^3P\rangle - 0.54\|2p^53d\ ^1P\rangle - 0.76\|2p^53d\ ^3D\rangle$

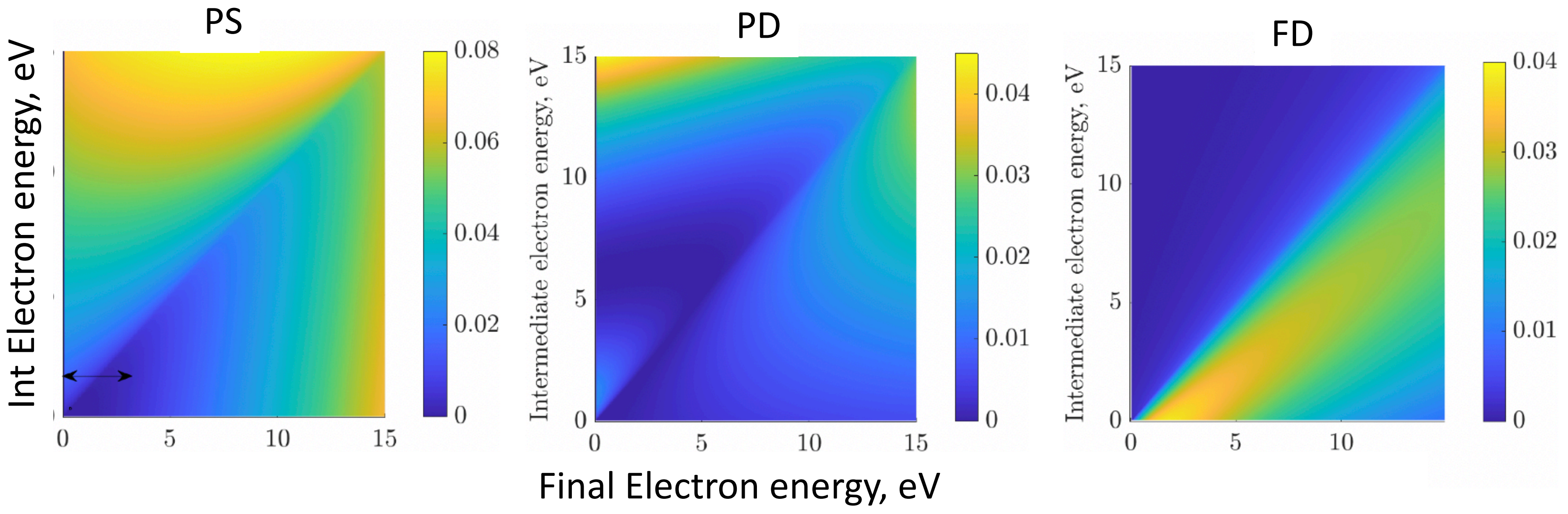
(CPC, **174** (2006)
Fischer, Computational Atomic Structure, 1994)

bound-continuum (MCHF+R):





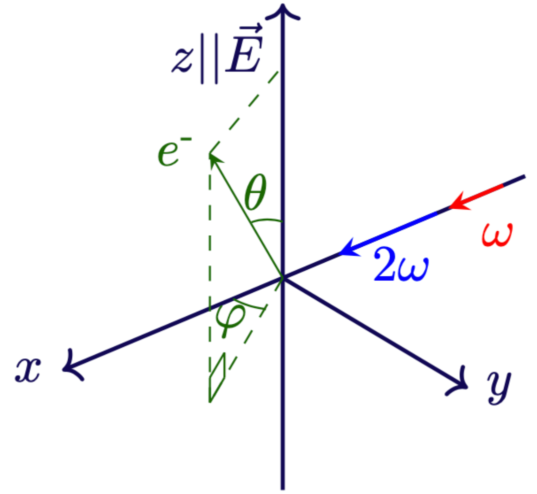
continuum-continuum (MCHF + PRA, **50**, (1994))

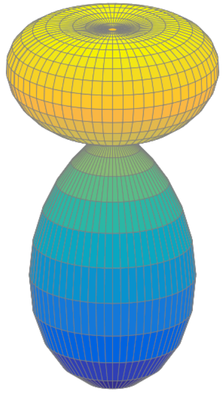


План доклада

- Цель работы
- Общая теория
- Задача когерентного контроля (w+2w)
- Задача RABBITT-спектроскопии (w+13w+15w+17w)

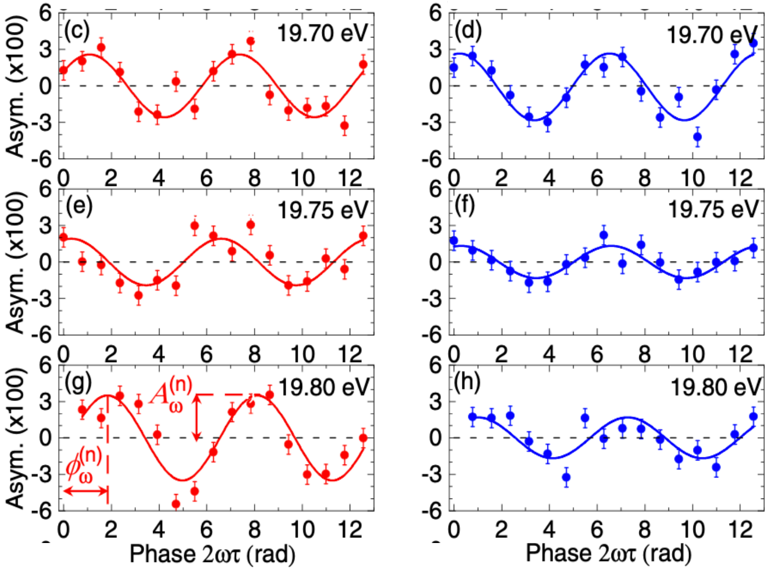
Результаты: $\boldsymbol{\omega}$+2$\boldsymbol{\omega}$ $\quad \boldsymbol{E}_{\omega+2\omega}(t) = E_\omega(t)\boldsymbol{e_\omega} e^{-i\omega t} + E_{2\omega}(t)\boldsymbol{e_{2\omega}} e^{-i(2\omega t+\phi)}$

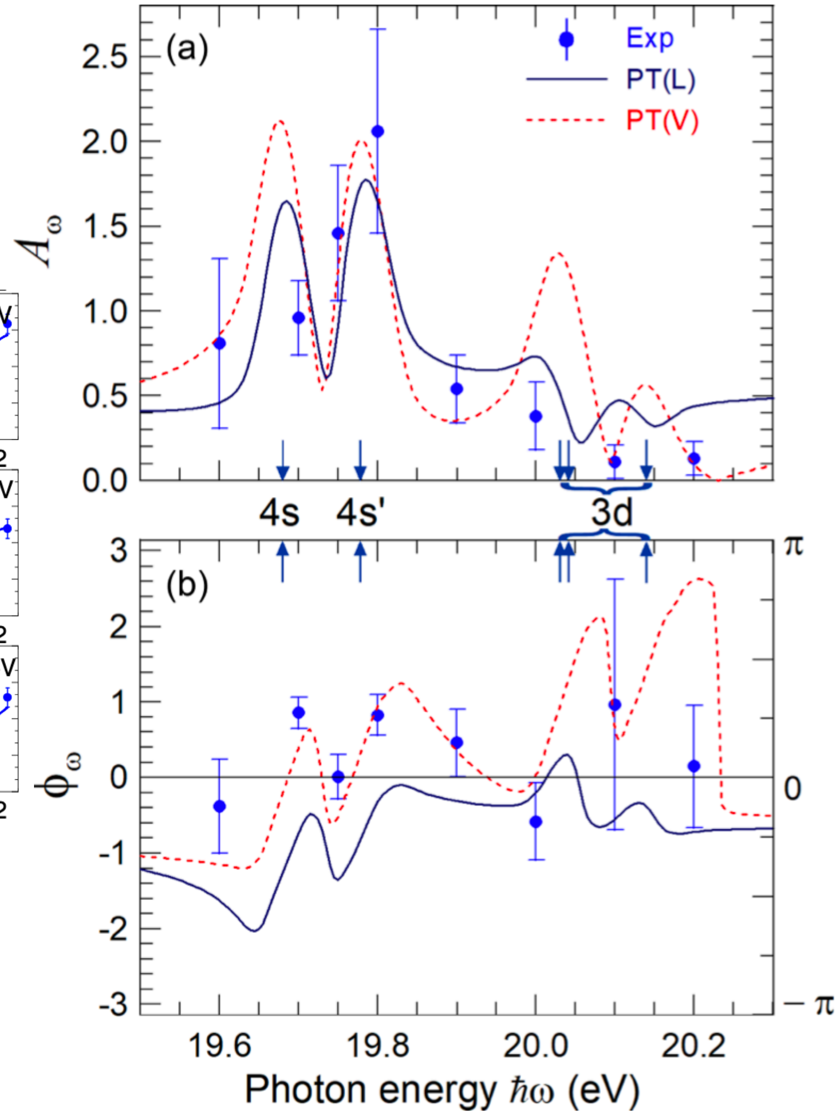




$$W(\theta,\varphi) = \frac{W_0}{4\pi}\left(1 + \sum_{k=1}^{4}\beta_k P_k(\cos\theta)\right)$$

$$A(0) \;=\; A_{\rm m}\cos(\phi - \phi_{\rm m})$$

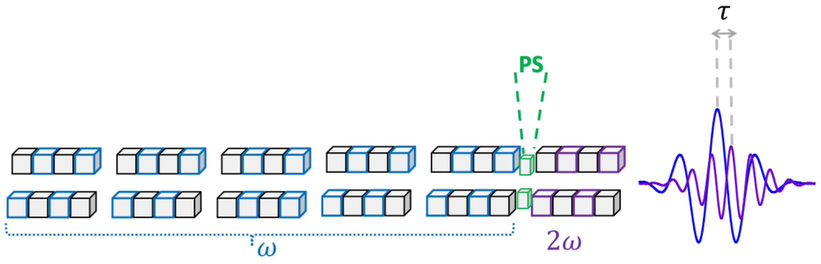


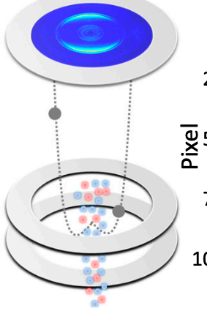


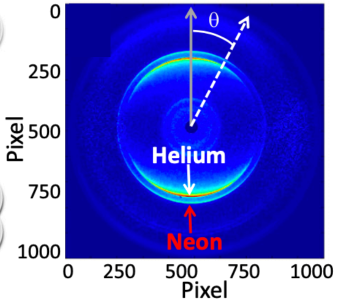
Выводы:

1) Рассматриваемые эффекты поддается наблюдению.

2) Подход позволяет качественно описать экспериментальные данные.



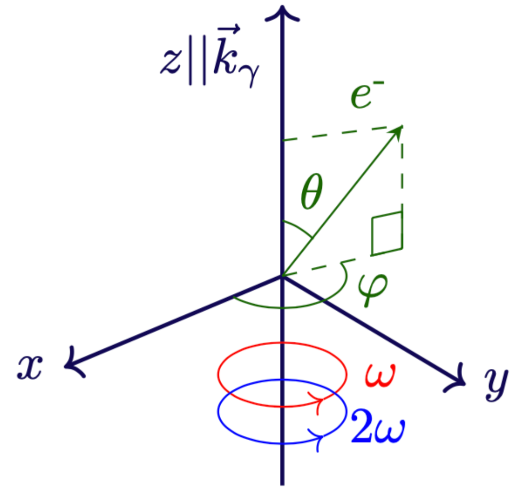


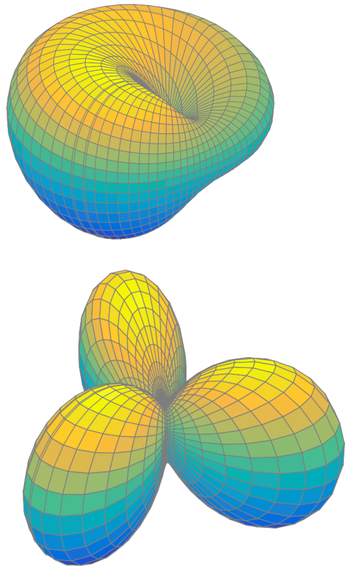


PRR **4**, 033231 (2022)
PRX **10**, 031070 (2020)

Результаты: $\boldsymbol{\omega}$+2$\boldsymbol{\omega}$

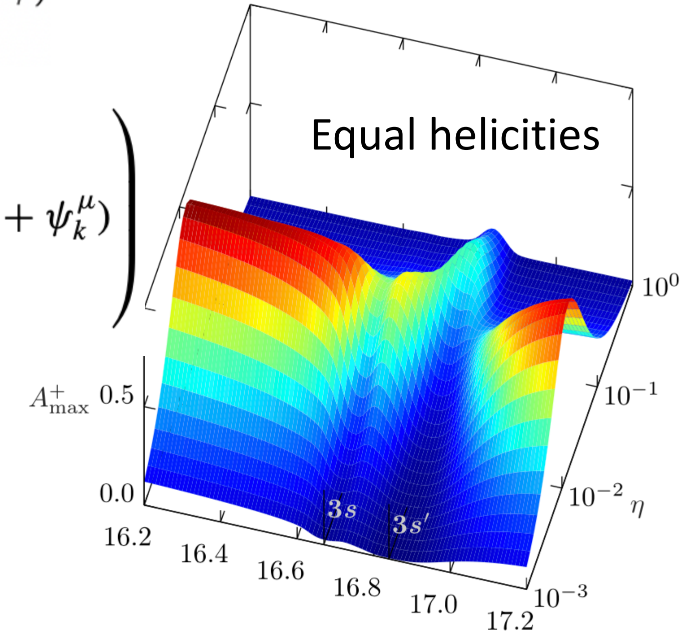
$$\boldsymbol{E}_{\omega+2\omega}(t) = E_\omega(t)\boldsymbol{e_\omega} e^{-i\omega t} + E_{2\omega}(t)\boldsymbol{e_{2\omega}} e^{-i(2\omega t+\phi)}$$

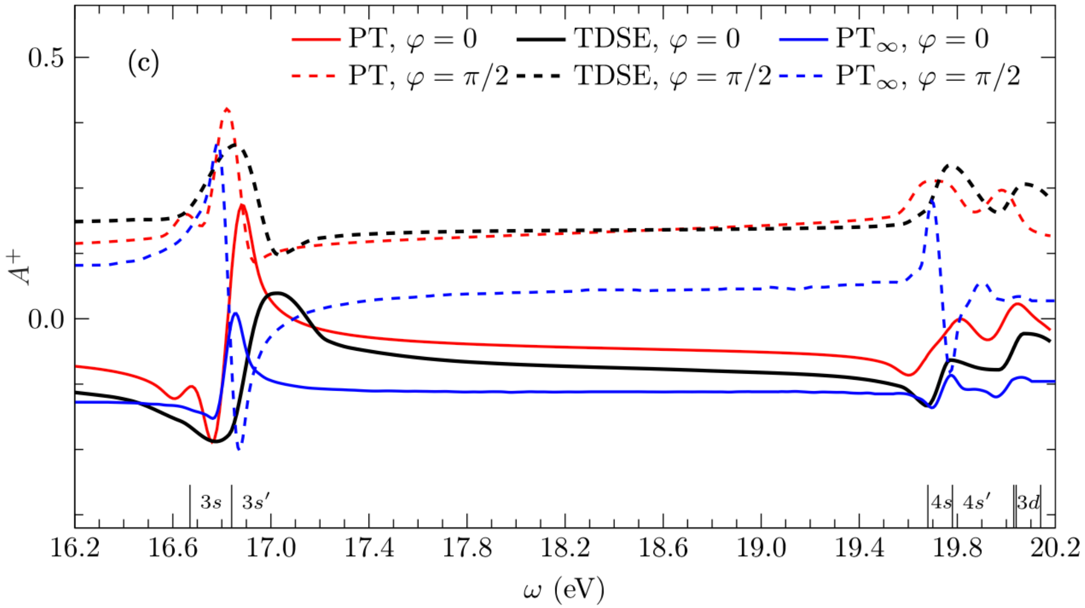




$$W(\theta,\varphi) = \frac{W_0}{4\pi}\left(1 + \sum_{\substack{k>0\\0\leqslant\mu\leqslant k}} |\beta_k^\mu| P_k^\mu(\cos\theta)\cos(\mu\varphi + \psi_k^\mu)\right)$$

$$A\left(\frac{\pi}{2},\varphi\right) = \frac{W\left(\frac{\pi}{2},\varphi\right) - W\left(\frac{\pi}{2},\varphi+\pi\right)}{W\left(\frac{\pi}{2},\varphi\right) + W\left(\frac{\pi}{2},\varphi+\pi\right)}$$

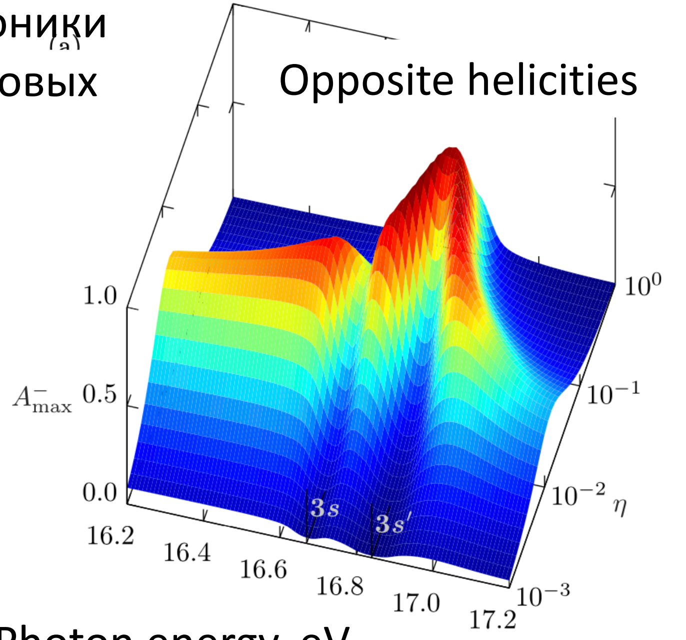




Выводы:

1) Изменение фазы второй гармоники приводит только к вращению угловых распределений.

2) Возможности когерентного контроля с помощью изменения интенсивности выше для случая гармоник противоположных Спиральностей.



Photon energy, eV

PRA **100**, 063417 (2019)

Результаты: $\boldsymbol{\omega}$+2$\boldsymbol{\omega}$

$$\boldsymbol{E}_{\omega+2\omega}(t) = E_\omega(t)\boldsymbol{e_\omega} e^{-i\omega t} + E_{2\omega}(t)\boldsymbol{e_{2\omega}} e^{-i(2\omega t+\phi)}$$

$$W(\vartheta,\varphi) = \sum_{kq} \beta_{kq} Y_{kq}(\vartheta,\varphi)$$

$$W = S_1(\vartheta,\varphi) + S_2(\vartheta,\varphi)\cos(\phi - \phi_{\max}(\vartheta,\varphi))$$

Выводы:

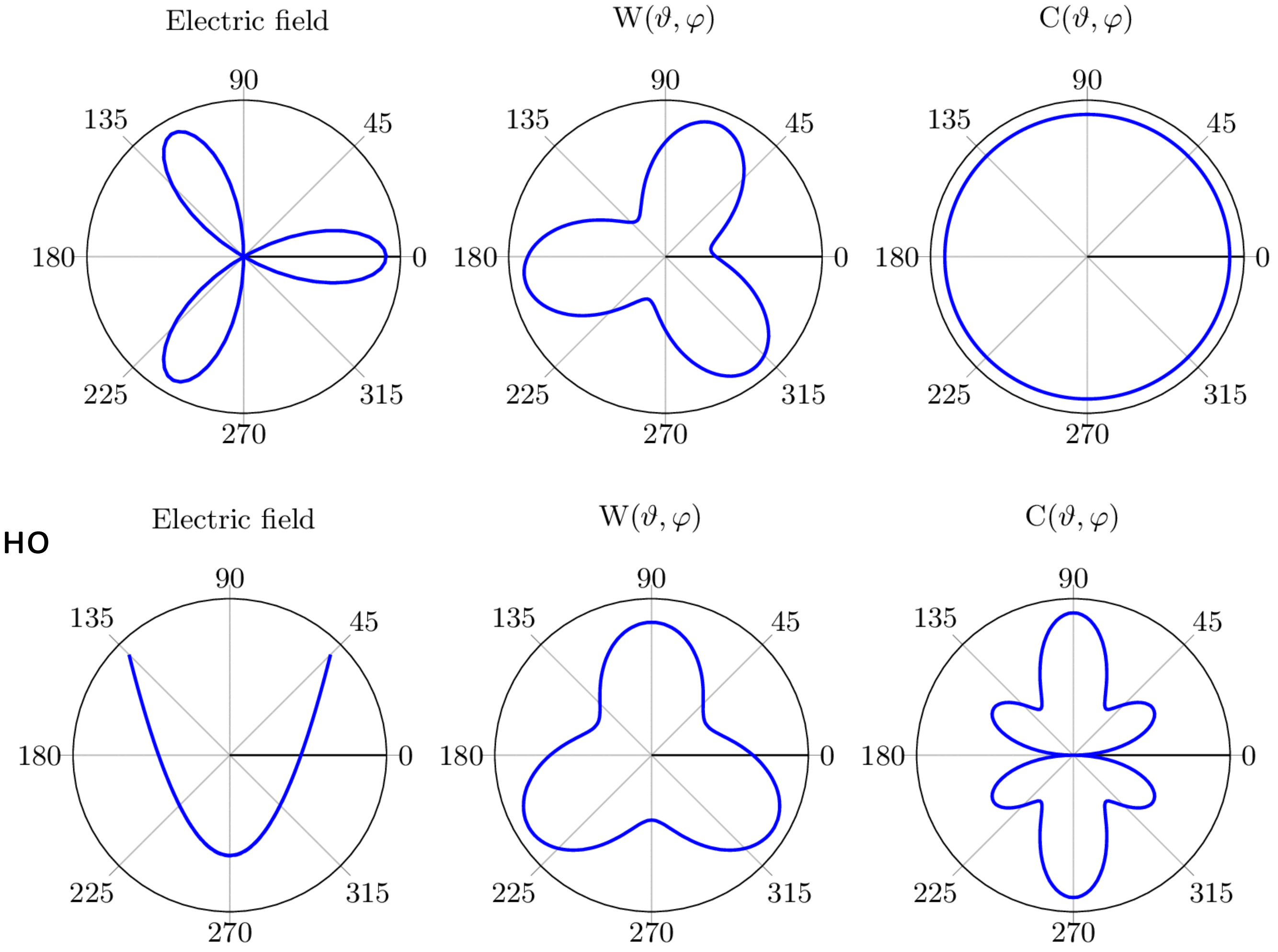
1) Возможности когерентного контроля выше для предельных поляризаций полей.

2) При варьировании фазы второй гармоники угловое распределение фотоэлектронов может как вращаться, так и изменять свою форму. Чистое вращение характерно для полей круговой поляризации, чистое изменение формы — для полей линейной поляризации.

$$A\left(\frac{\pi}{2},\varphi\right) = \frac{W\left(\frac{\pi}{2},\varphi\right) - W\left(\frac{\pi}{2},\varphi+\pi\right)}{W\left(\frac{\pi}{2},\varphi\right) + W\left(\frac{\pi}{2},\varphi+\pi\right)}$$

$$A(0) = A_{\mathrm{m}}\cos(\phi - \phi_{\mathrm{m}})$$

Трансформация формы угловых распределений



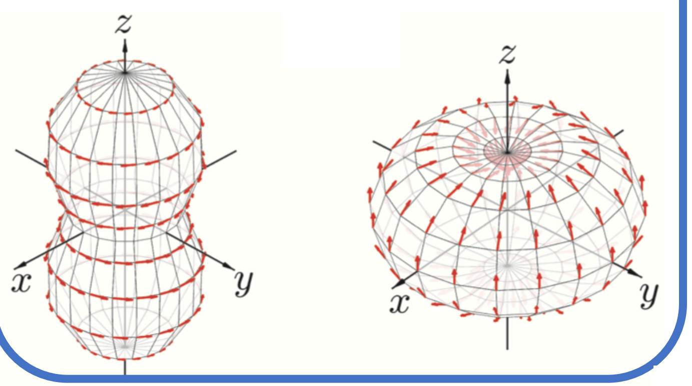
$$C(\vartheta,\varphi) = \left| \frac{W(\vartheta,\varphi)_{\phi=\phi_{\max}} - W(\vartheta,\varphi)_{\phi=\phi_{\max}+\pi}}{W(\vartheta,\varphi)_{\phi=\phi_{\max}} + W(\vartheta,\varphi)_{\phi=\phi_{\max}+\pi}} \right|$$

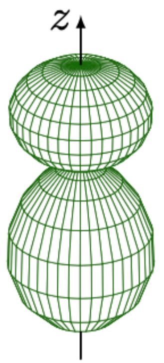
ЖЭТФ, **162**, 1 (7), 72–86 (2022)

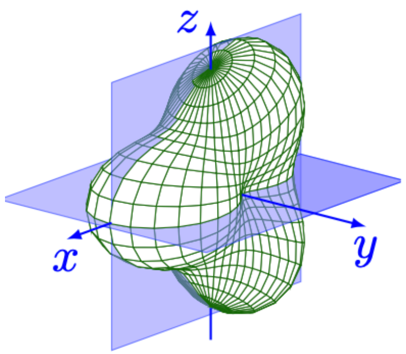
Результаты: **ω+2ω**

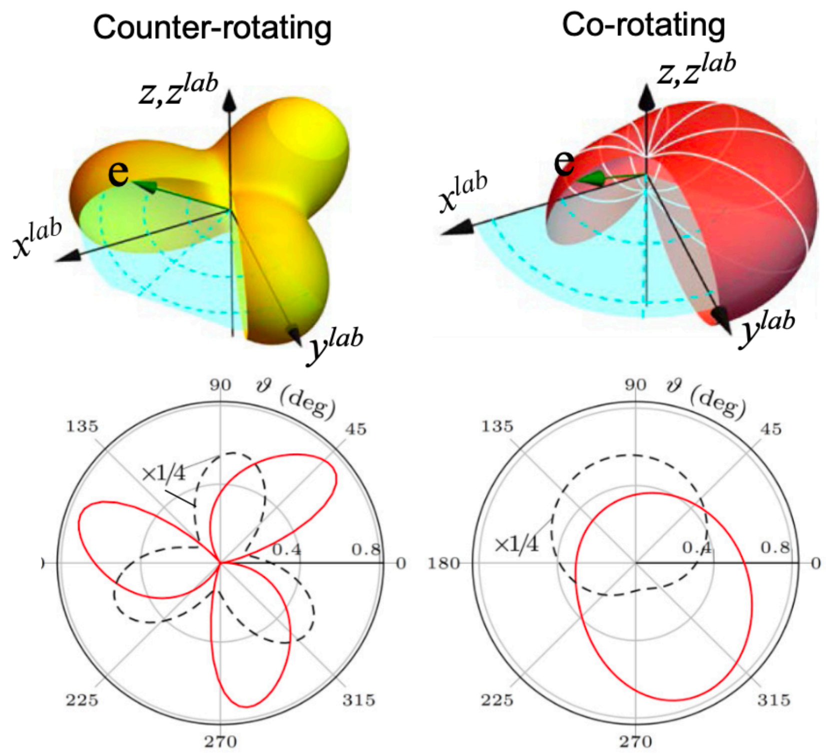
$$\boldsymbol{E}_{\omega+2\omega}(t) = E_{\omega}(t)\boldsymbol{e_{\omega}}e^{-i\omega t} + E_{2\omega}(t)\boldsymbol{e_{2\omega}}e^{-i(2\omega t+\phi)}$$

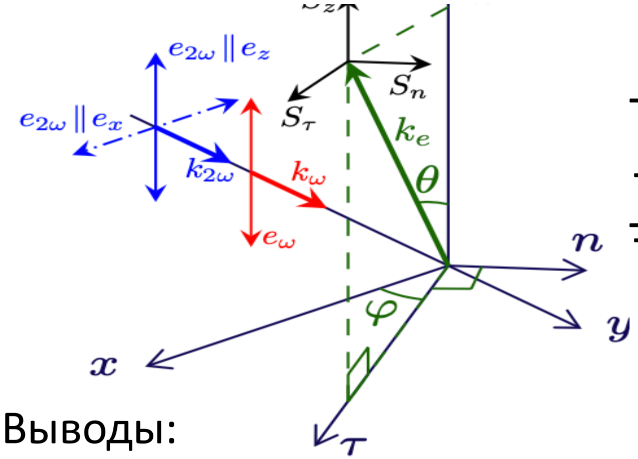
Однофотонный режим:

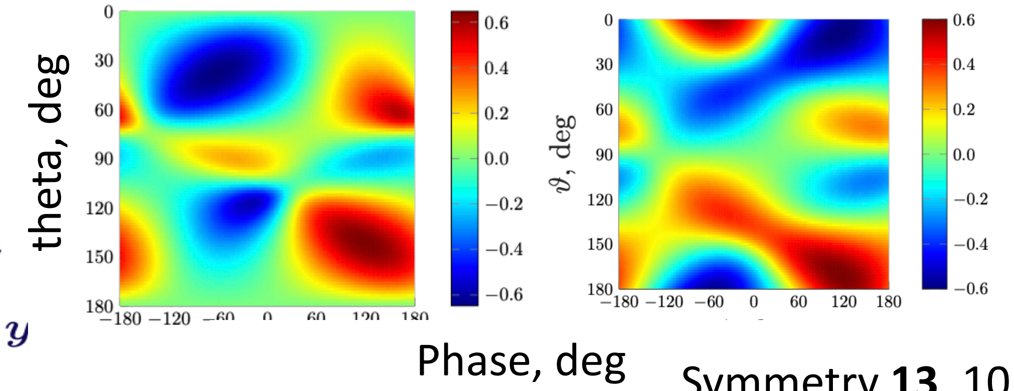












Symmetry **13**, 1015 (2021); PRA **102**, 053116 (2020)

Выводы:

1) При **ω**+2**ω** ионизации ожидается высокая степень спиновой поляризации при энергиях фотонов **ω** в окрестности возбужденных состояний. Степень когерентного контроля над спиновой поляризацией может быть больше 50%.

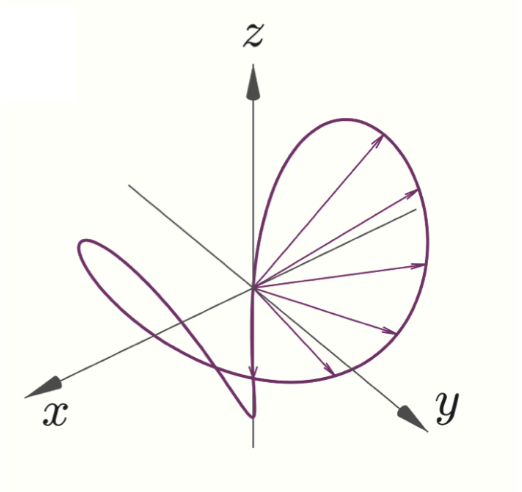
2) Для гармоник, линейно поляризованных в одном направлении, не появляется новых компонент спиновой поляризации. Для гармоник, поляризованных в перпендикулярных направлениях, появляются другие компоненты.

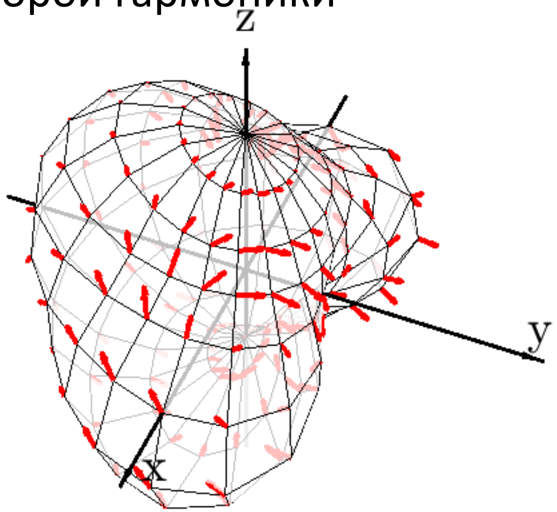
3) Для циркулярно поляризованных в одной плоскости гармоник компонента P_z спиновой поляризации имеет ту же форму, что и угловые распределения, и появляются другие компоненты спиновой поляризации.

Результаты: ω+2ω

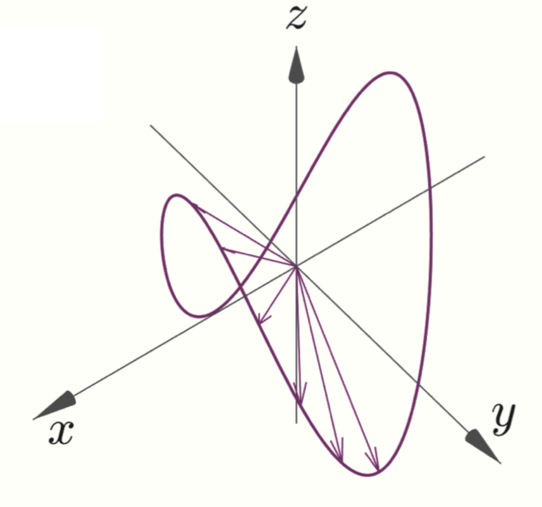
$$\boldsymbol{E}_{\omega+2\omega}(t) = E_\omega(t)\boldsymbol{e_\omega}e^{-i\omega t} + E_{2\omega}(t)\boldsymbol{e_{2\omega}}e^{-i(2\omega t+\phi)}$$

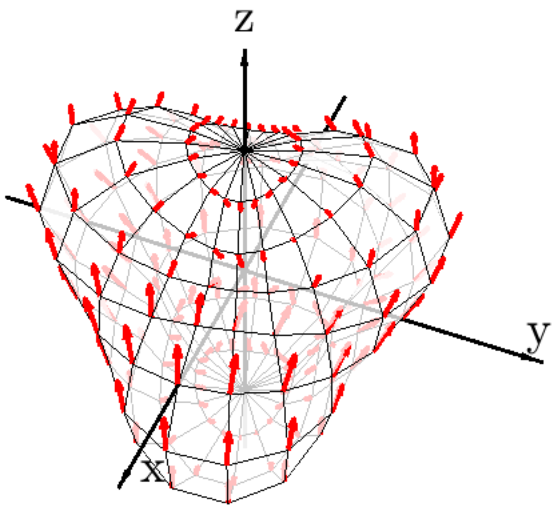
Линейная поляризации основной гармоники
Циркулярная поляризации второй гармоники

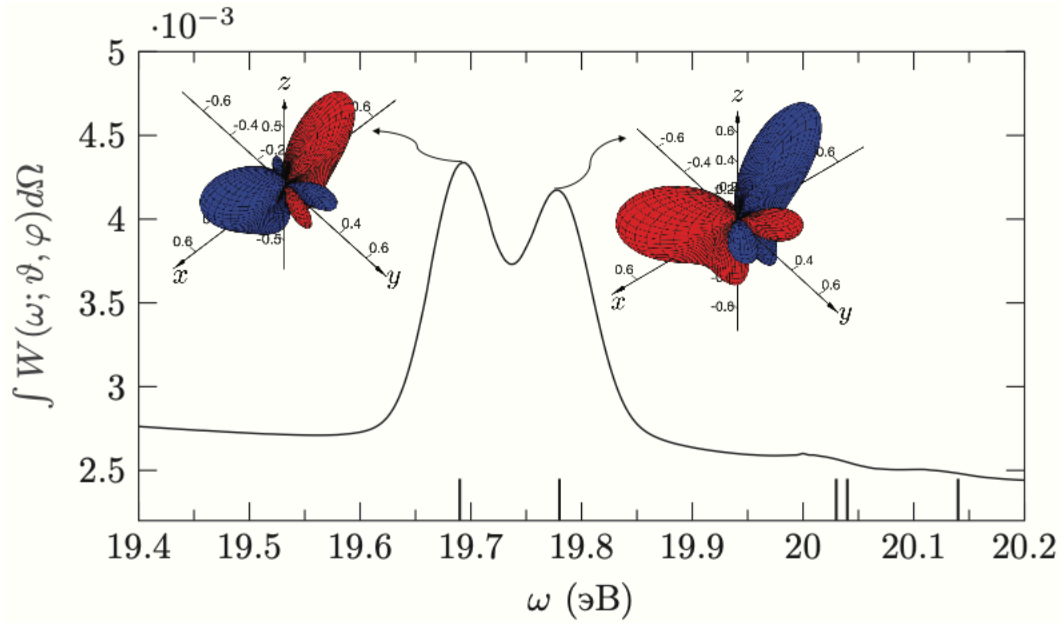


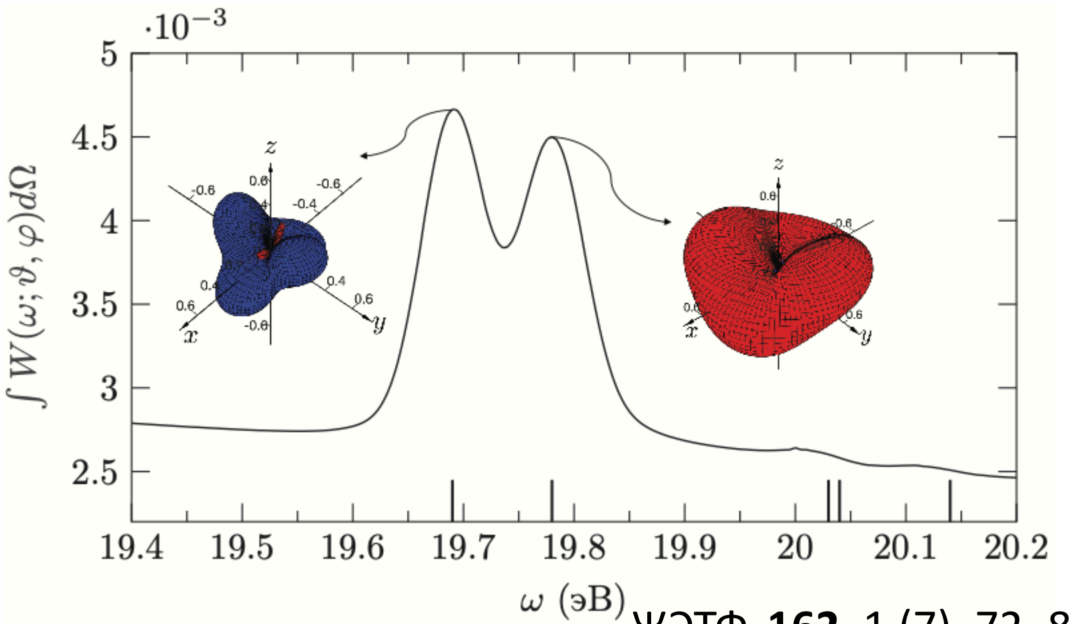


Циркулярная поляризации основной гармоники
Линейная поляризации второй гармоники









ЖЭТФ, **162**, 1 (7), 72–86 (2022)

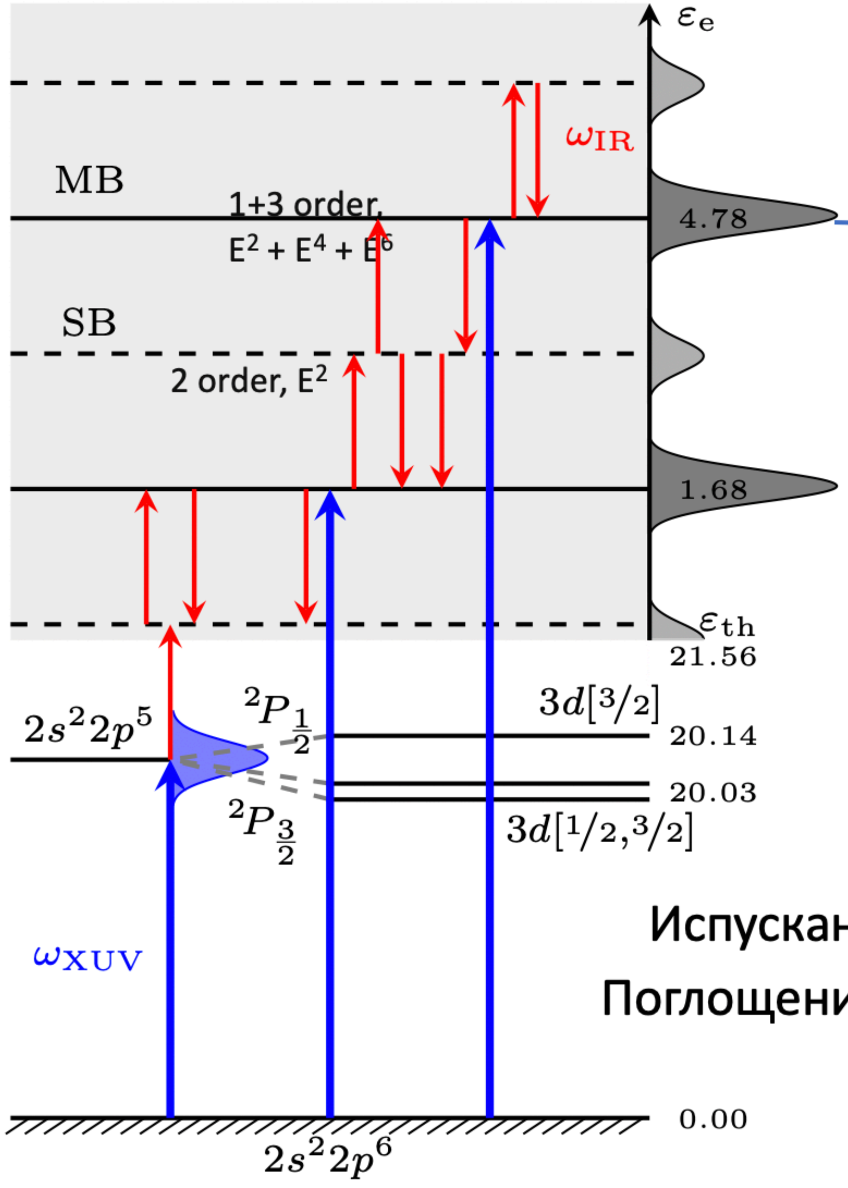
План доклада

- Цель работы
- Общая теория
- Задача когерентного контроля (w+2w)
- Задача RABBITT-спектроскопии (w+13w+15w+17w)

Результаты: RABBITT

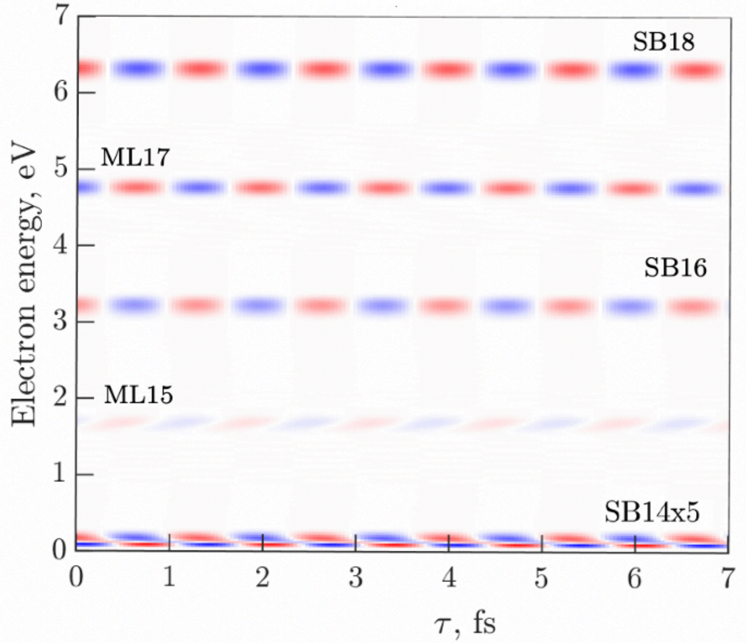
$$\mathbf{E}(t) = \sum_N \cos^2(t/\sigma_N)\mathbf{n}_\lambda g_\lambda^N E_N \cos(\omega_N t + \phi_N)$$
$$+ \mathbf{n}_\lambda g_\lambda^{\mathrm{ir}} E_{\mathrm{ir}} \cos^2(t/\sigma_{\mathrm{ir}}) \cos(\omega_{\mathrm{ir}} t + \phi_{\mathrm{ir}}),$$

$\lambda_{IR} = 798 \div 806\ nm$



	I, Вт/см^2	T, фс
ω_{IR}	$0.25 \div 4 \cdot 10^{12}$	20
ω_{XUV}	$4 \cdot 10^9$	10

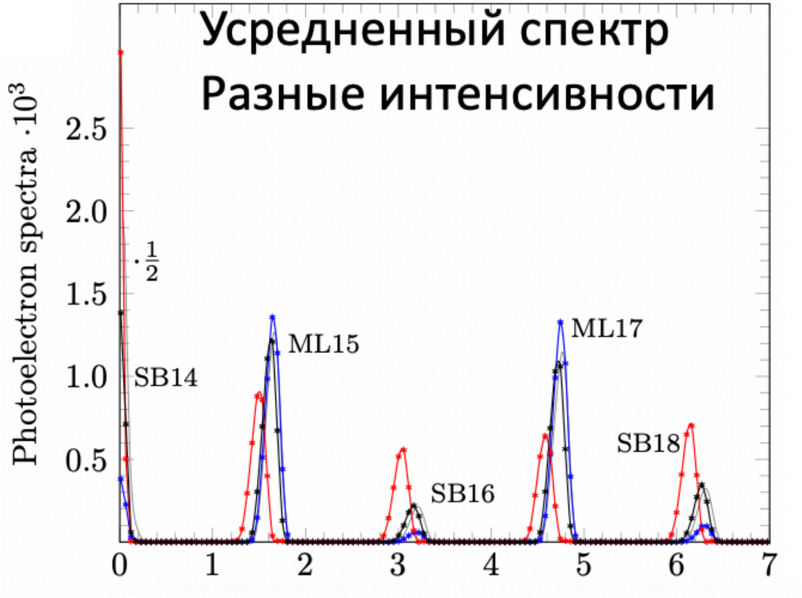
$$\mathrm{SB}(\tau) = a + b\cos(2\omega_{\mathrm{ir}}\tau - \phi_{\max})$$



Испускание фотона ω_{ir} : $U \sim e^{i(\omega_{ir}t + \phi_{ir})}$

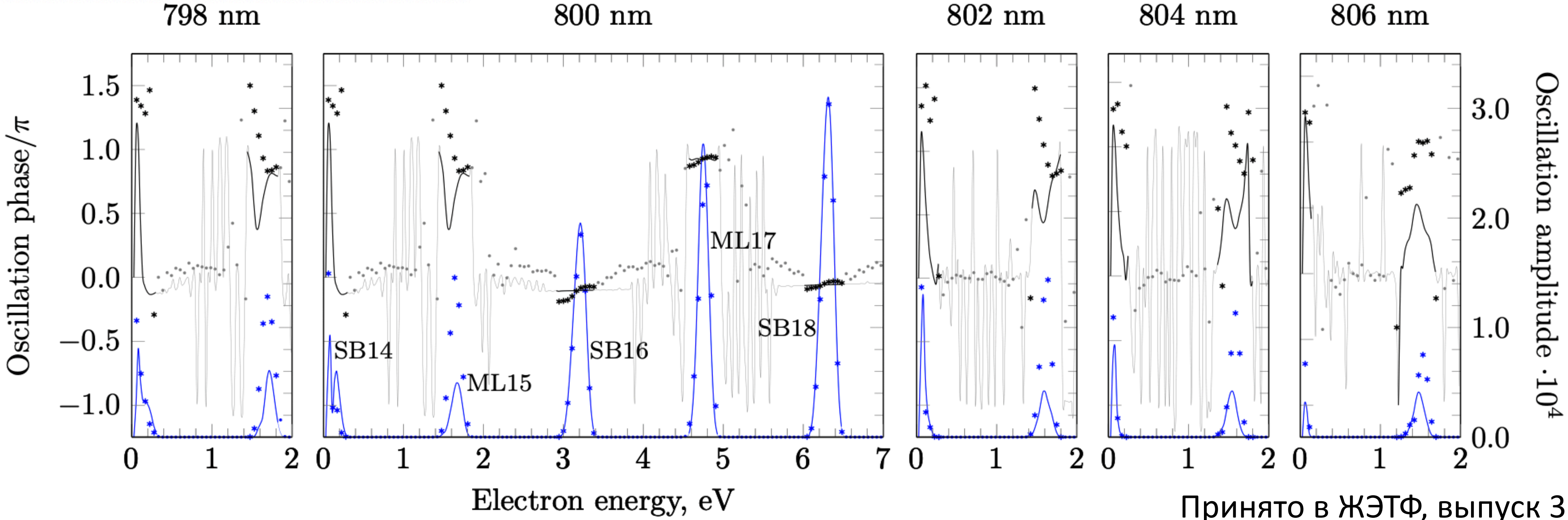
Поглощение фотона ω_{ir} : $U \sim e^{-i(\omega_{ir}t + \phi_{ir})}$

Результаты: RABBITT



Выводы:

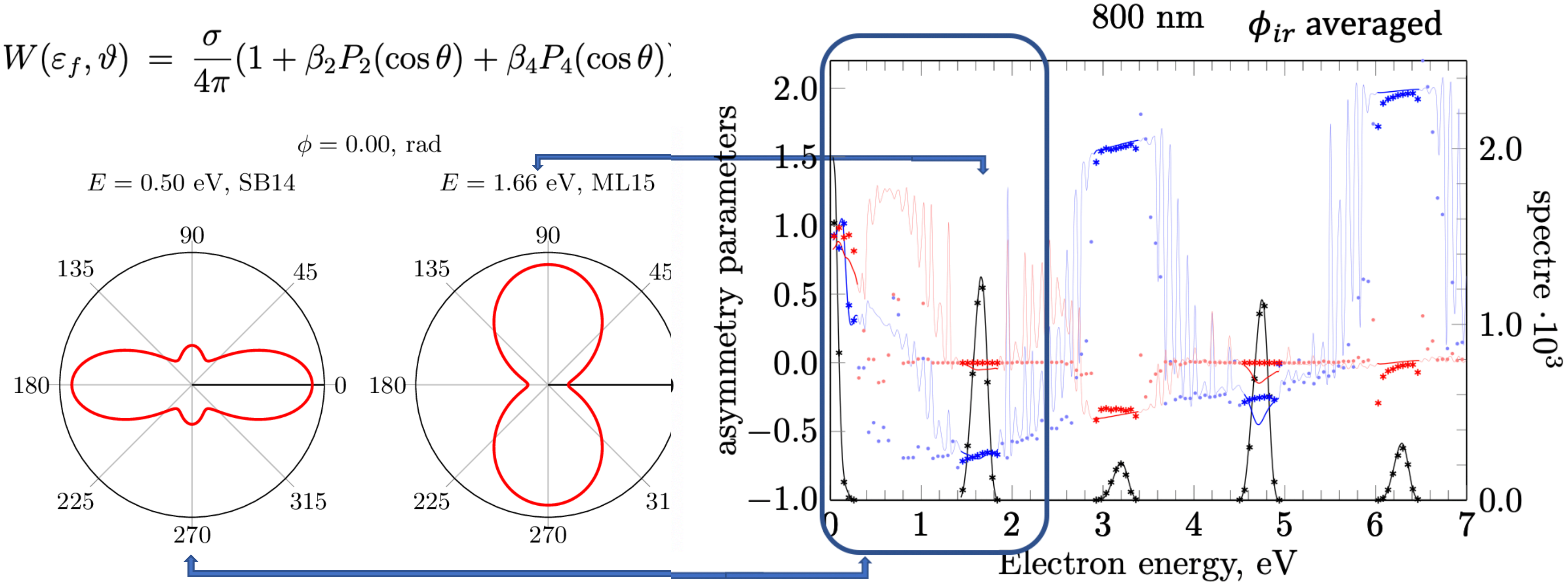
1) В припороговой области ТВ не позволяет учесть все эффекты, и это связано не только со Штарковским сдвигом.
2) Для более высоких энергий результаты полностью совпадают.
3) Возможность возбуждения дискретных состояний приводит к резкой модуляции припороговой боковой линии с энергией, проявляясь как в формировании внутренней структуры, так и в скачкообразном изменении фазы.

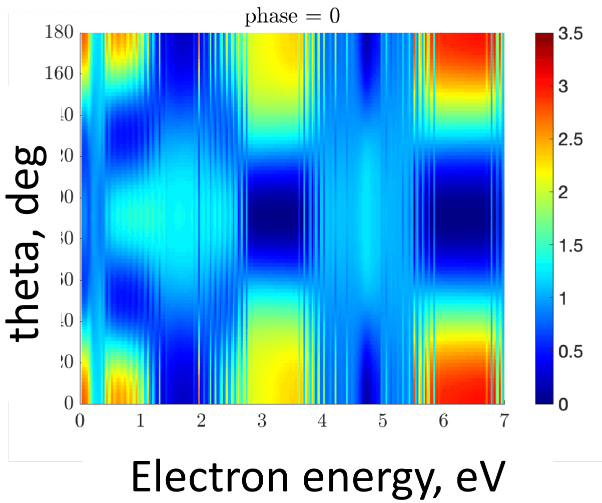


Принято в ЖЭТФ, выпуск 3 (2023)

Результаты: RABBITT

$$W(\varepsilon_f, \vartheta) = \frac{\sigma}{4\pi}(1 + \beta_2 P_2(\cos\theta) + \beta_4 P_4(\cos\theta))$$





Выводы:

1) Форма угловых распределений зависит от фазы ϕ_{ir} существенно слабее, чем интегральный фотоэлектронный спектр.

2) В основных линиях параметр угловой анизотропии β_2 близок к однофотонномму, но немного отклоняются от него. Зависимость от фазы ϕ_{ir} проявляется, в основном, для параметра β_4, который существует исключительно благодаря взаимодействию с IR полем.

3) Параметры угловой анизотропии в припороговом сайдбенде существенно отличаются от параметров угловой анизотропии в остальных.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования РФ, грант No 075-15-2021-1353;
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант No 20-52-12023;
Министерства науки и высшего образования РФ (проект No 0818-2020-0005)
с использованием вычислительных ресурсов ЦКП ’Центр данных ДВО РАН’.

Спасибо за внимание!