

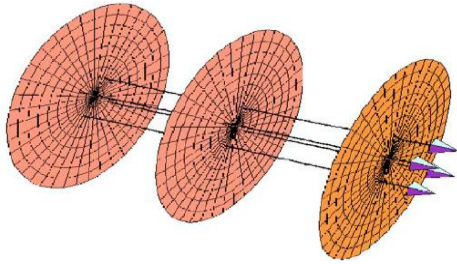
# **Ионизация атомных ансамблей бесселевыми пучками**

М.Д. Киселев, Е.В. Грызлова, А.Н. Грум-Гржимайло,  
М.М. Попова, С.Н. Юдин

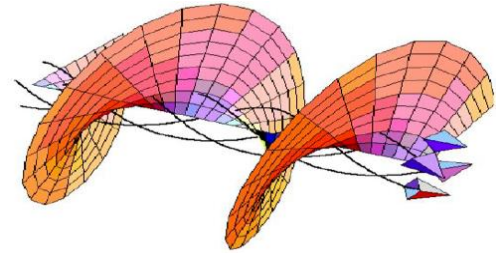


# Сравнение плоской волны и закрученного света

*Плосковолновое излучение*



*Закрученное излучение*



Является решением волнового уравнения  $\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t}\right) A(\mathbf{r}, t) = 0$

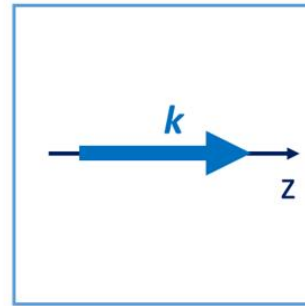
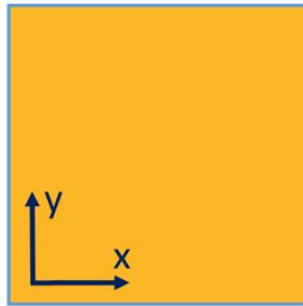
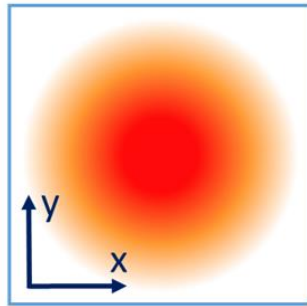
$$A(\mathbf{r}, t) \sim e^{-i\omega t + i\mathbf{k}r}$$

$$A(\mathbf{r}, t) \sim e^{-i\omega t + ik_z r} e^{im\varphi} J_m(k_{\perp} r)$$

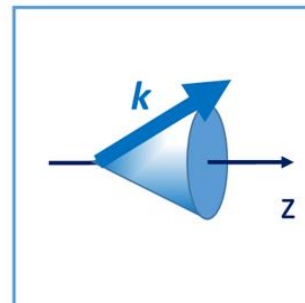
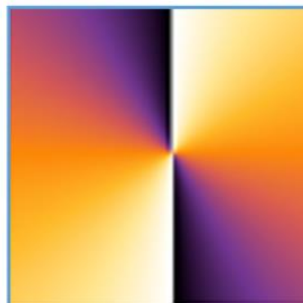
Профиль интенсивности

Фаза

Импульс



Плоская  
волна



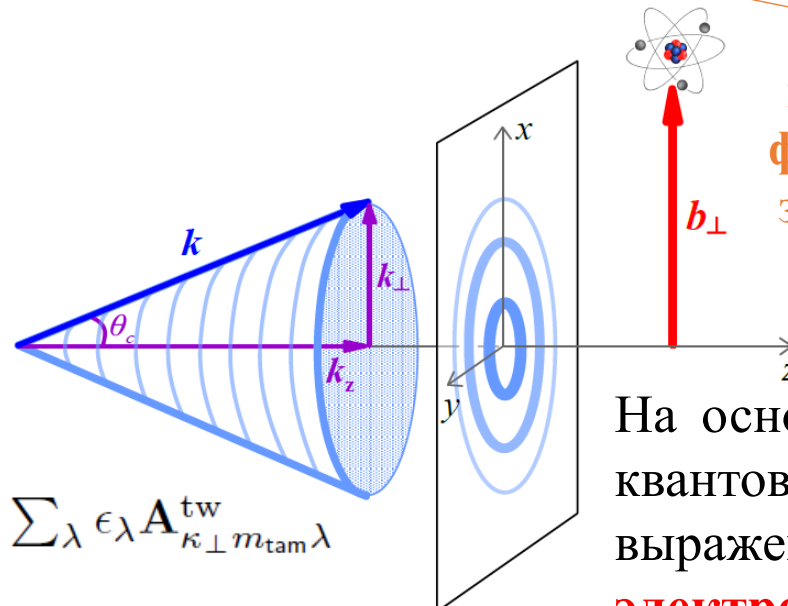
Закрученный  
свет

# Взаимодействие закрученного света с мишенью

$$M_{M_i \lambda m_{\text{там}} M_f}^{(\text{tw})}(p; \theta_c, b) = \int a_{\kappa_{\perp} m_{\text{там}}}(\mathbf{k}_{\perp}) e^{-i\mathbf{k}_{\perp} \mathbf{b}_{\perp}} M_{M_i \lambda M_f}^{(\text{pl})}(\mathbf{k}, p) \frac{d^2 \mathbf{k}_{\perp}}{4\pi^2}$$

матричный элемент  
фотоионизации атома  
закрученным светом

матричный элемент  
фотоионизации атома  
плоской волной



$$a_{\kappa_{\perp} m_{\text{там}}}(\mathbf{k}_{\perp}) = (-i)^{m_{\text{там}}} e^{im_{\text{там}} \phi_k} \sqrt{\frac{2\pi}{k_{\perp}}} \delta(k_{\perp} - \kappa_{\perp})$$

На основе данного соотношения и с использованием квантовой теории углового момента можно получить выражение для **углового распределения фотоэлектронов**, образующихся при фотоионизации закрученным излучением.

*Мишень:*

- однородная и макроскопическая;
- атомы распределены случайно и равномерно в плоскости  $xy$ ;
- начальное состояние атомов не поляризовано

# Взаимодействие закрученного света с атомами

## Утверждение:

Чтобы учесть влияние эффекта закрученности света (в случае бесселевой волны) на угловое распределение фотоэлектронов при облучении мишени, состоящей из неполяризованных и равномерно распределённых атомов, необходимо домножить каждую сферическую гармонику  $Y_{KQ}$  в выражении для углового распределения фотоэлектронов, образованных под действием плоской электромагнитной волны, на малую  $D$ -функцию Вигнера вида  $d_{QQ}^K(\theta_c)$ .

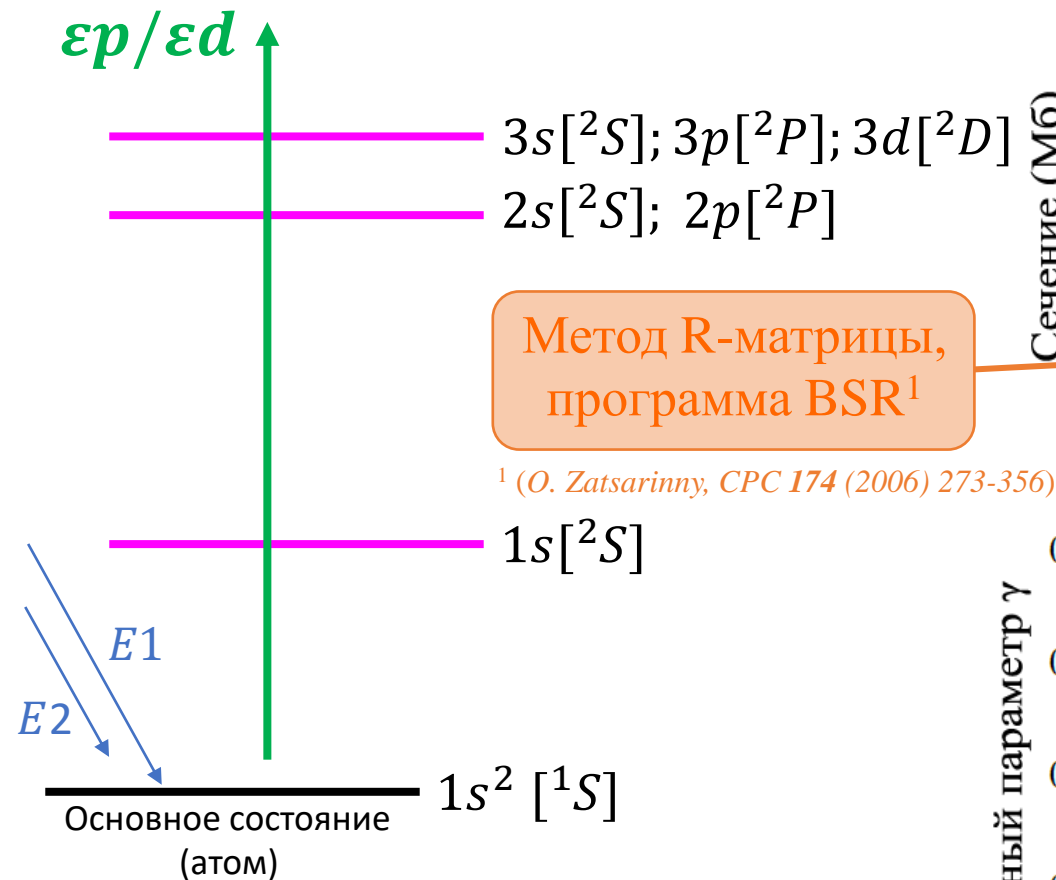
Утверждение справедливо для произвольного числа учитываемых мультиполей, а также при любой рассматриваемой атомной структуре.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_s = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left( 1 - \frac{\beta}{2} \sqrt{\frac{4\pi}{5}} \left[ Y_{20}(\theta_p, \varphi_p) - \frac{P\sqrt{6}}{2} (Y_{2-2}(\theta_p, \varphi_p) + Y_{2+2}(\theta_p, \varphi_p)) \right] + \left( \delta + \frac{\gamma}{5} \right) \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{10}(\theta_p, \varphi_p) - \right. \\ \left. - \frac{\gamma}{5} \sqrt{\frac{4\pi}{7}} \left[ Y_{30}(\theta_p, \varphi_p) - P\sqrt{\frac{5}{6}} (Y_{3-2}(\theta_p, \varphi_p) + Y_{3+2}(\theta_p, \varphi_p)) \right] \right)$$

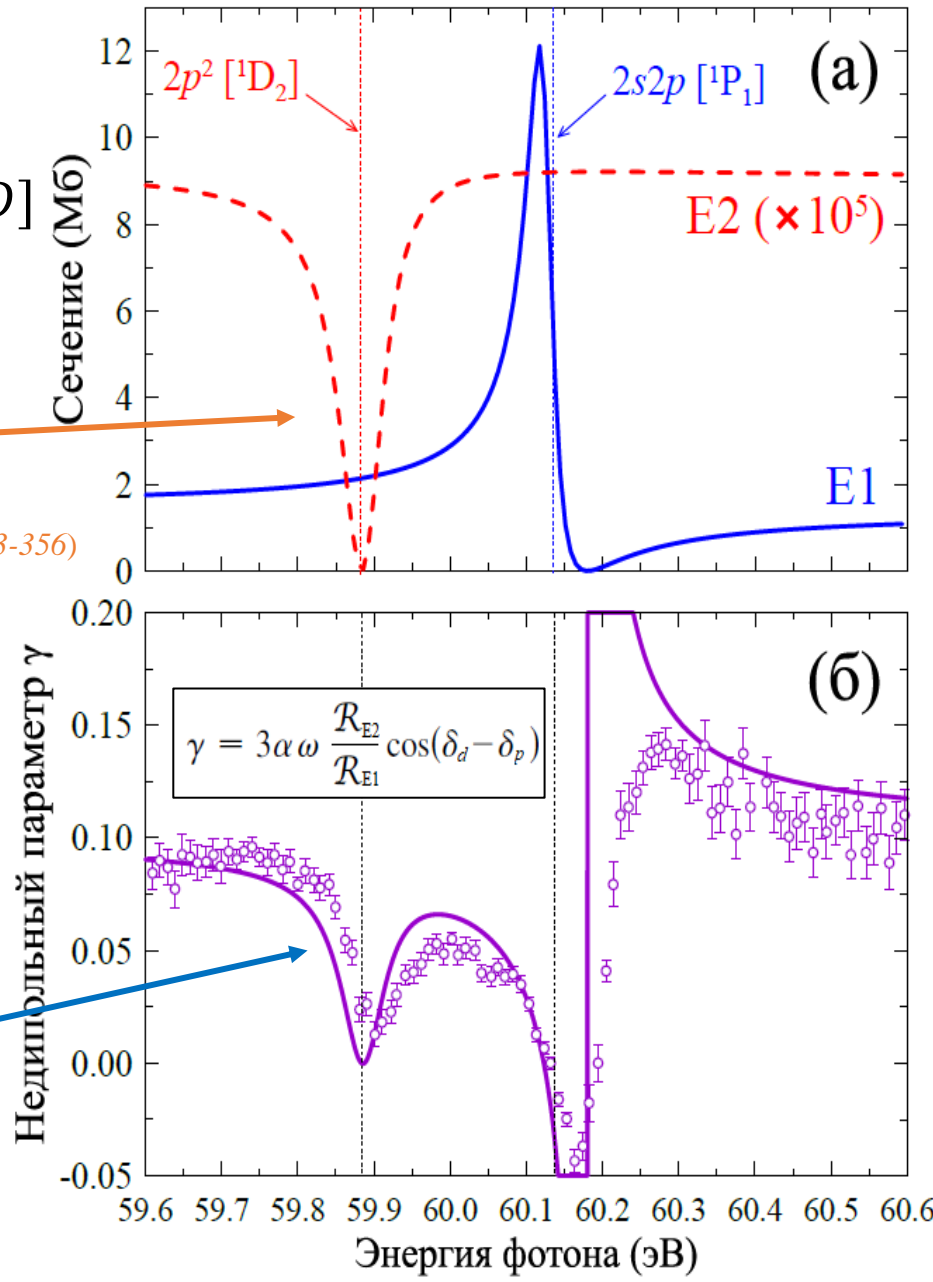
$P = 1$  – линейная поляризация;  $P = 0$  – циркулярная поляризация

# Ионизация гелия

## закрученным светом



$\beta = const, \delta \rightarrow 0$   
 $\gamma = \gamma(\omega)$





# Диагностика пучка закрученного излучения

$$\left(\frac{d\sigma^{(tw,circ)}}{d\Omega}\right)_S = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left(1 - \frac{\beta}{2} P_2(\cos\theta_p) P_2(\cos\theta_c) + \left(\delta + \frac{\gamma}{5}\right) P_1(\cos\theta_p) P_1(\cos\theta_c) - \frac{\gamma}{5} P_3(\cos\theta_p) P_3(\cos\theta_c)\right)$$

If one put:

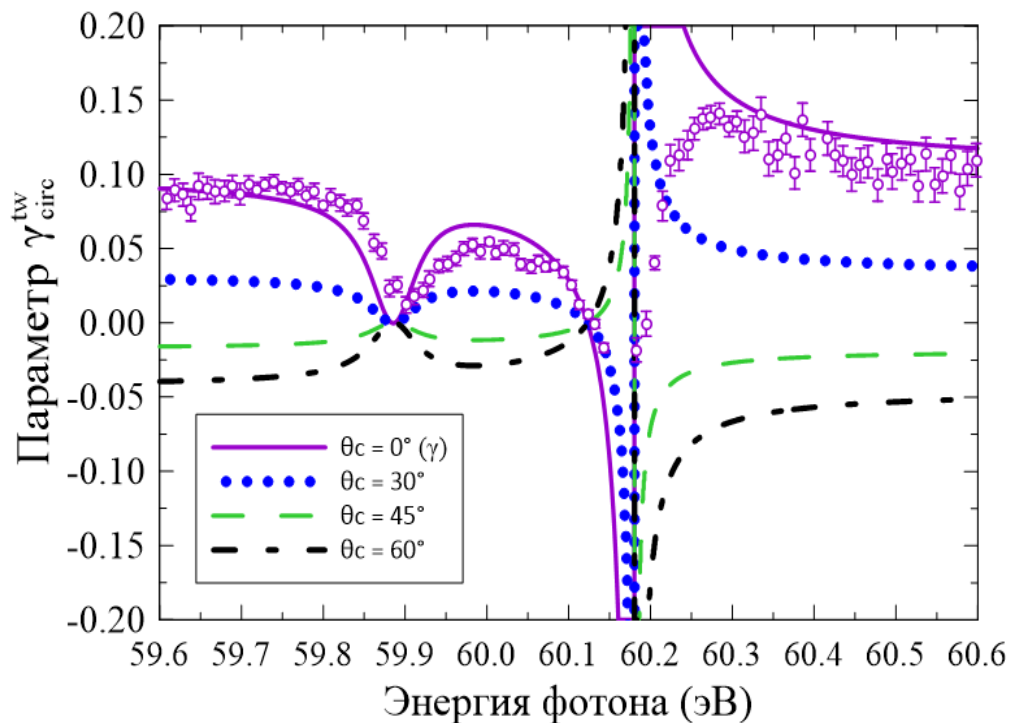
$$\beta_{circ}^{tw} = \beta P_2(\cos\theta_c),$$

$$\gamma_{circ}^{tw} = \gamma P_3(\cos\theta_c),$$

$$\delta_{circ}^{tw} = \left(\delta + \frac{\gamma}{5}\right) P_1(\cos\theta_c) - \frac{\gamma}{5} P_3(\cos\theta_c),$$



$$\left(\frac{d\sigma^{(tw,circ)}}{d\Omega}\right)_S = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left(1 - \frac{\beta_{circ}^{tw}}{2} P_2(\cos\theta_p) + \left(\delta_{circ}^{tw} + \frac{\gamma_{circ}^{tw}}{5}\right) P_1(\cos\theta_p) - \frac{\gamma_{circ}^{tw}}{5} P_3(\cos\theta_p)\right)$$



Это означает, что если провести эксперимент по фотоионизации как плоским, так и закрученным (бесселевым) излучением с одним и тем же атомом и извлечь параметры анизотропии, то становится возможным диагностировать бесселев пучок.

*Angular distribution of photoelectrons generated in atomic ionization by twisted radiation*

Maksim D. Kiselev, Elena V. Gryzlova, and Alexei N. Grum-Grzhimailo

**Physical Review A** **108** 023117 (2023)



# Взаимодействие закрученного света с мишенью

С использованием «закрученного» матричного элемента, можно получить статистические тензоры:

**фотоэлектрона**

*эффекты  
закрученности*

$$\rho_{k_s q_s}^{(tw)} [1/2, 1/2] = \sum_{kq} D_{q q_s}^{k*}(\phi_p, \theta_p, 0) d_{qq}^k(\theta_c) \sum_{LL' pp'} \rho_{kq}[pL, p'L'] (k_l 0, k_s q_s | k q_s) B^{Lp, L' p'} [k_l, k_s, k]$$

стат. тензор фотона  
определённого типа  
и мультиполности

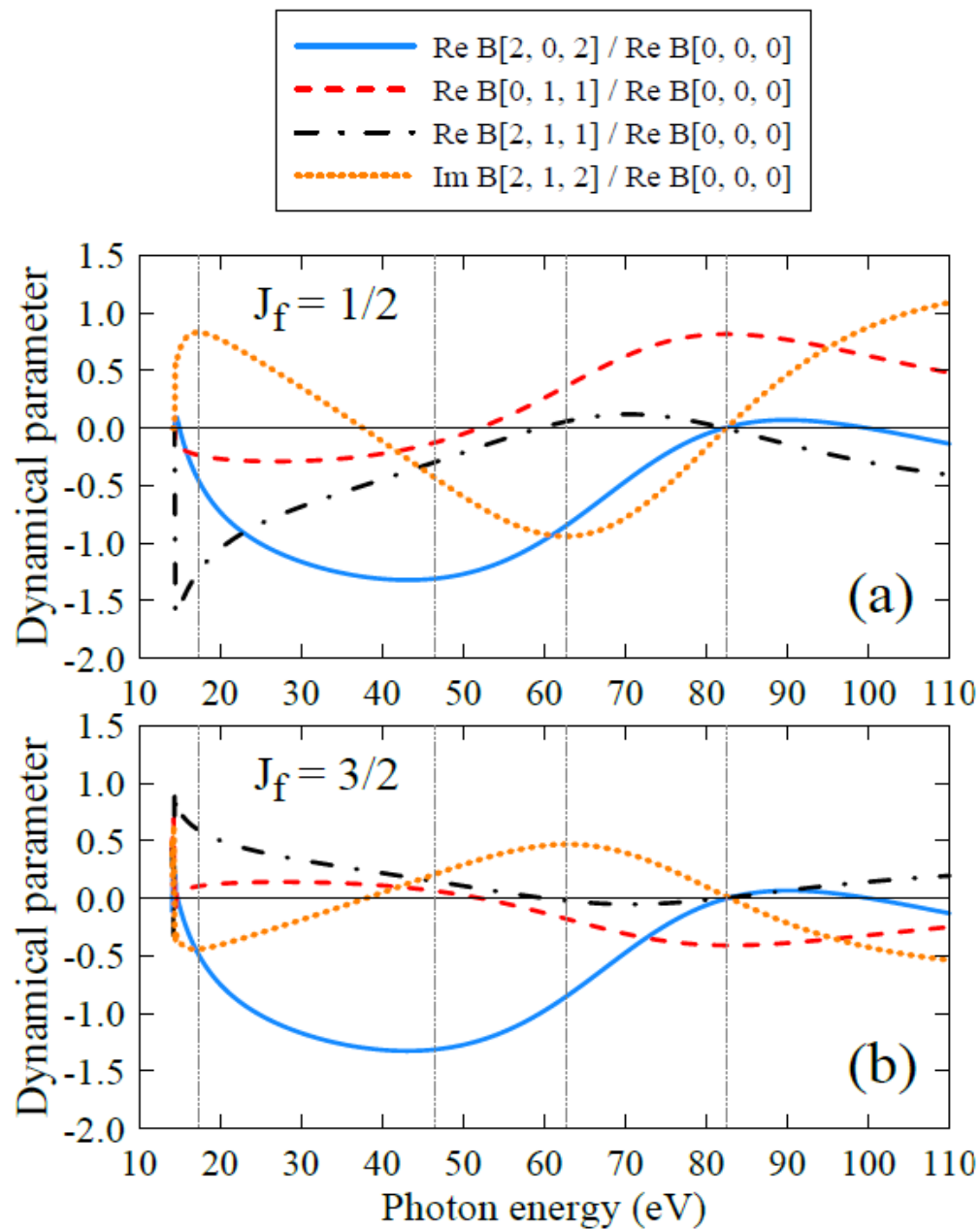
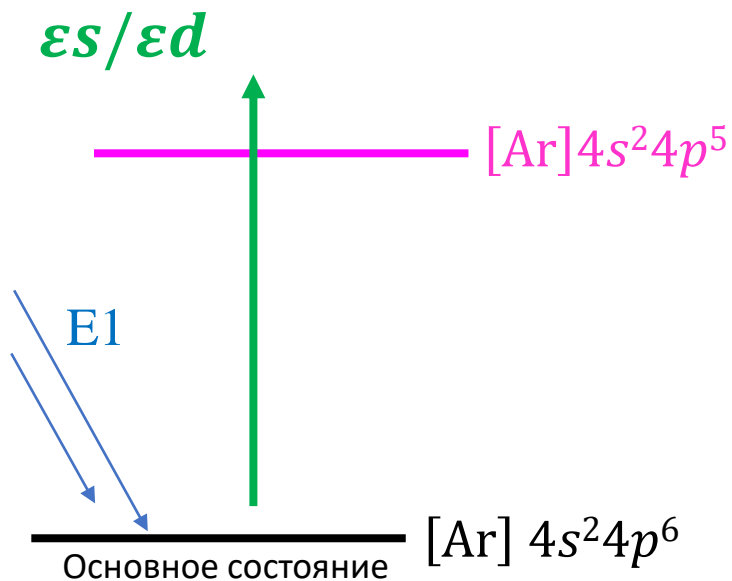
динамический параметр  
(не зависит от параметров  
поляризации)

**фотоиона**

*эффекты  
закрученности*

$$\rho_{k_f q_f}^{(tw)} [J_f, J_f] = \delta_{k k_f} \delta_{q q_f} d_{qq}^k(\theta_c) \sum_{LL' pp'} \rho_{kq}[pL, p'L'] \bar{B}^{Lp, L' p'} [k]$$

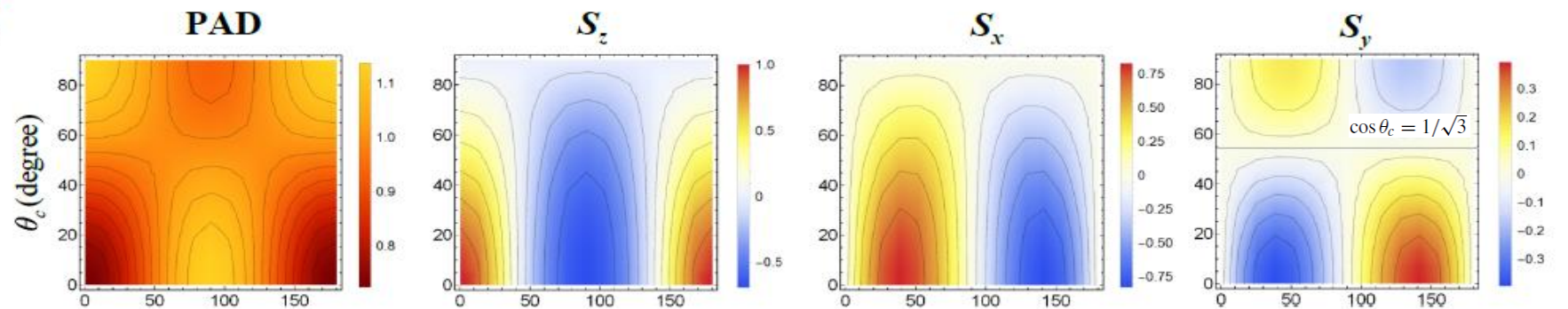
# Ионизация 4p оболочки криптона (дипольное приближение)



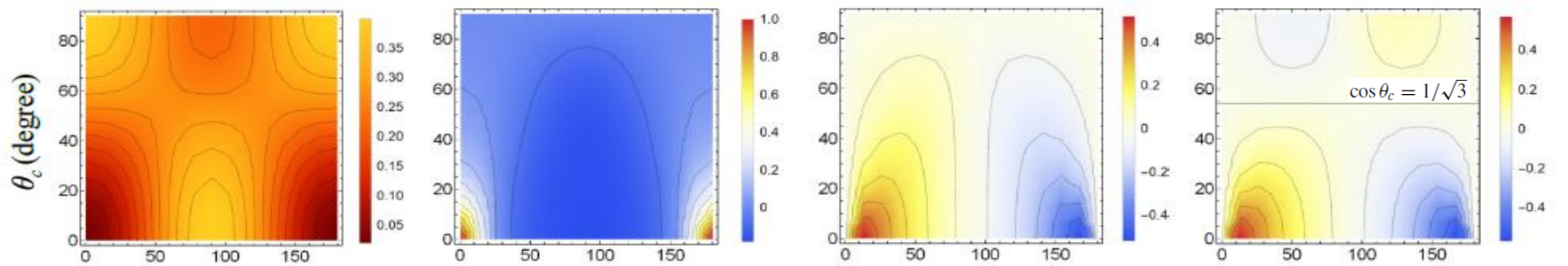
# CIRCULAR POLARIZATION

Photon energy

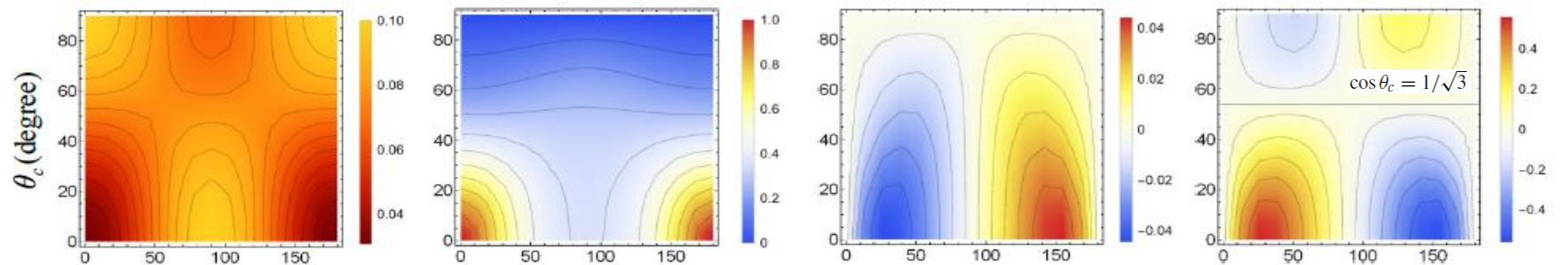
16.9 eV



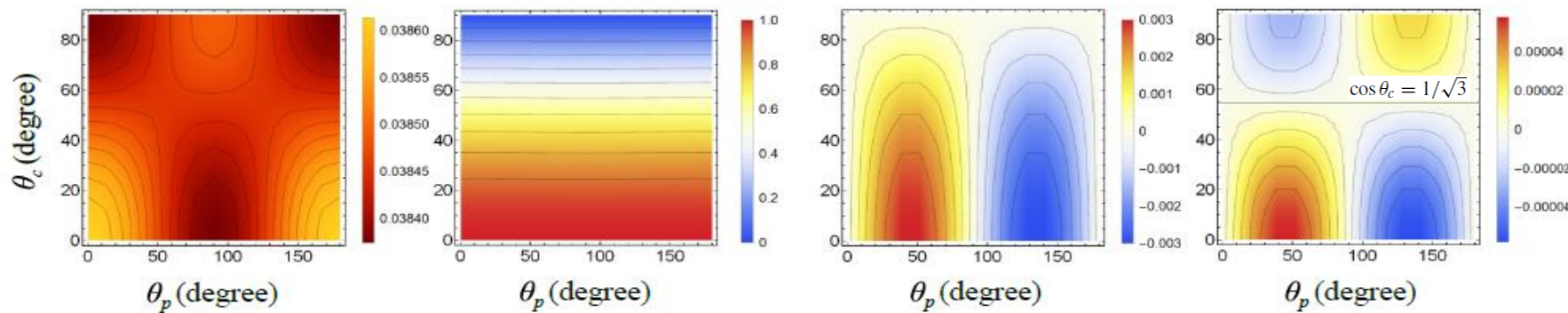
46.6 eV



62.6 eV



82.5 eV



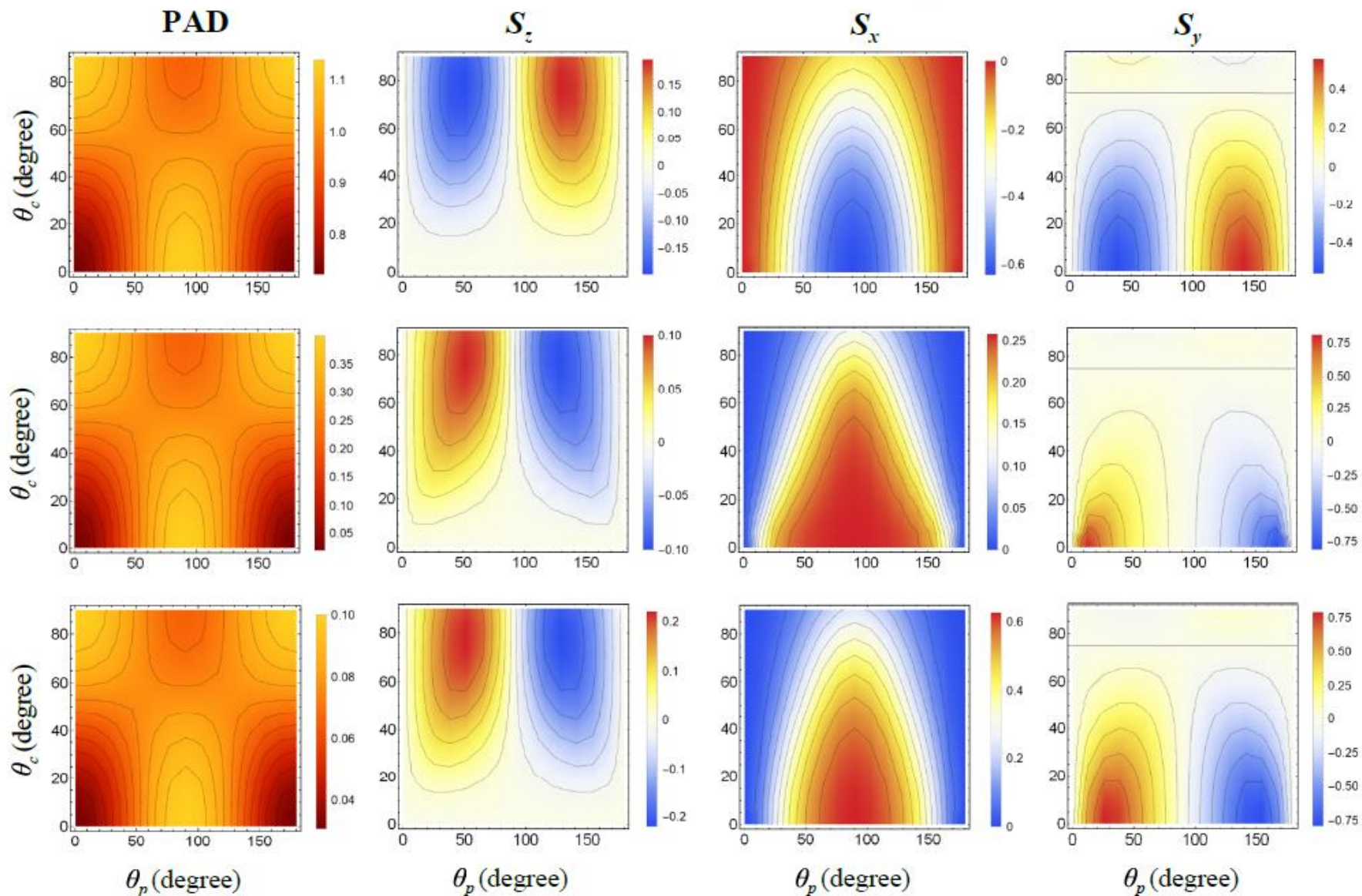
# LINEAR POLARIZATION ( $\phi_p = 45^\circ$ )

Photon energy

16.9 eV

46.6 eV

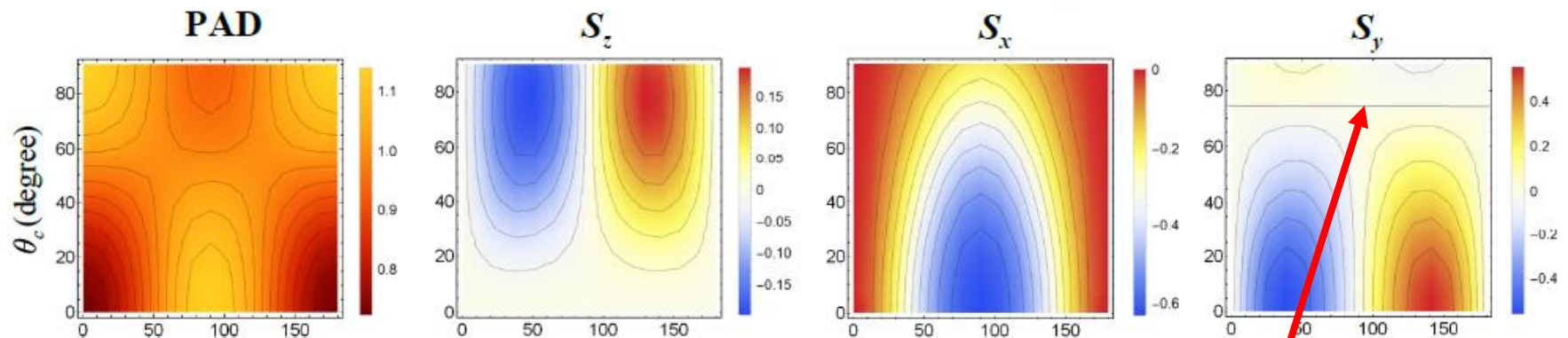
62.6 eV



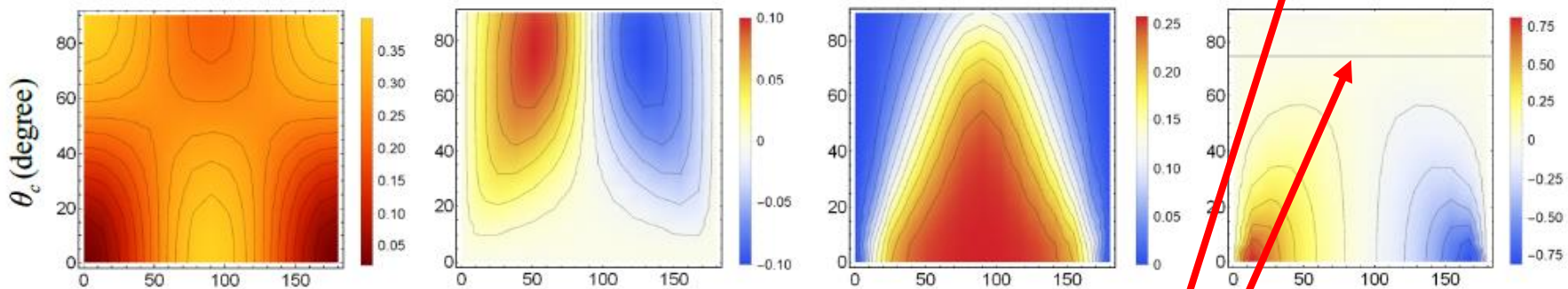
# LINEAR POLARIZATION ( $\phi_p = 45^\circ$ )

Photon energy

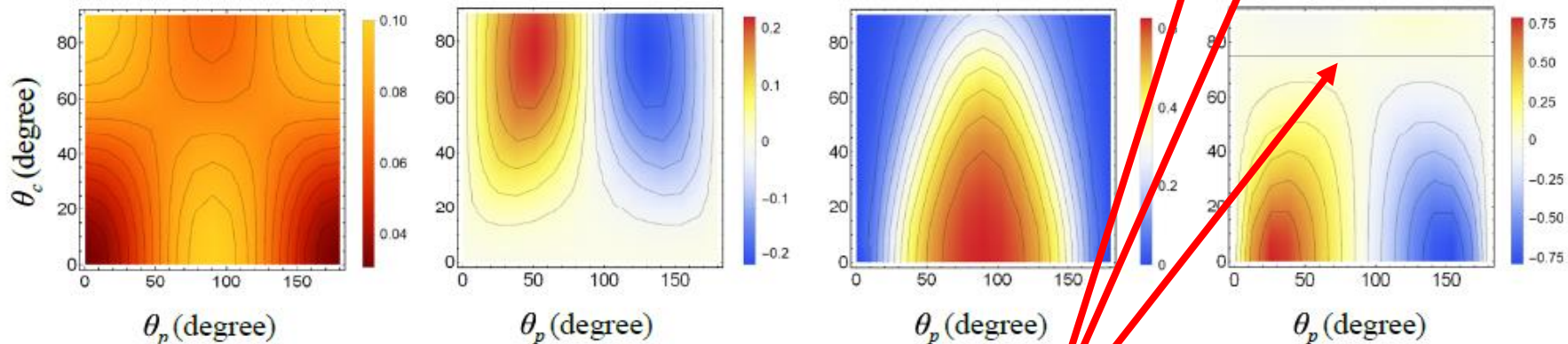
16.9 eV



46.6 eV



62.6 eV



$$\sin^2(\theta_c/2) = (4 - \sqrt{2})/7$$

*Vector parameters in atomic ionization by twisted light: Polarization of the electron and residual ion*

Maksim D. Kiselev, Elena V. Gryzlova, and Alexei N. Grum-Grzhimailo

**Physical Review A** **109** 023108 (2024)

## Другие результаты группы:

*Аттосекундная интерферометрия при участии дискретных состояний*

Попова М.М., Юдин С.Н., Грызлова Е.В., Киселев М.Д., Грум-Гржимайло А.Н.

**ЖЭТФ 163 (№3), 2023**

*Аттосекундная интерферометрия атома неона: угловые распределения фотоэлектронов*

Юдин С.Н., Попова М.М., Киселев М.Д., Бурков С.М., Грызлова Е.В., Грум-Гржимайло А.Н.

**Вестник Московского университета 78, 2023**

*Многоуровневая модель многофотонных процессов в атоме гелия в сильном лазерном поле: учет ионизации*

Хайрулин И.Р., Антонов В.А., Емелин М.Ю., Попова М.М., Грызлова Е.В., Рябикин М.Ю.

**Оптика и спектроскопия 131 (№2), 2023**

*On Phase and Amplitude Extraction in Bichromatic Ionization: A Proposal*

Popova Maria M., Grum-Grzhimailo Alexei N., Gryzlova Elena V.

**Photonics 10, 2023**

*Maximizing the Response of a Helium Atom at the Third Harmonic of an Intense Femtosecond Ultraviolet Pulse*

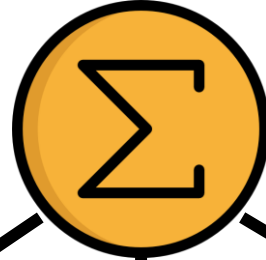
Khairulin I.R., Emelin M.Y., Popova Maria M., Gryzlova Elena V., Ryabikin M.Y., Antonov V.A.

**Photonics 10, 2023**

*Ultrafast Resonant State Formation by the Coupling of Rydberg and Dark Autoionizing States*

Singh M., Fareed M.A., Birulia V., Magunov A., Grum-Grzhimailo A.N., Lassonde P., Laramée A., Marcelino R., Shirinabadi R.G., Legare F., Ozaki T., Strelkov V.

**Physical Review Letters 130, 2023**



8 статей

9 докладов

3 стипендии

М.Д. Киселев

М.М. Попова

+ Премии по Программе развития МГУ  
в категории «Выдающиеся публикации»



Спасибо за внимание!

# Поляризация фотоэлектрона и фотоиона

**фотоэлектрона**

$$\begin{aligned} S_z &= \frac{\rho_{10}[1/2, 1/2]}{\rho_{00}[1/2, 1/2]}, \\ S_x &= -i \frac{\rho_{11}[1/2, 1/2] + \rho_{1-1}[1/2, 1/2]}{\sqrt{2}\rho_{00}[1/2, 1/2]}, \\ S_y &= -\frac{\rho_{11}[1/2, 1/2] - \rho_{1-1}[1/2, 1/2]}{\sqrt{2}\rho_{00}[1/2, 1/2]}, \\ W &= \sqrt{2}\rho_{00}[1/2, 1/2]. \end{aligned}$$

**фотоиона**

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_1^{(tw)} &= \frac{\rho_{10}^{(tw)}[J_f, J_f]}{\rho_{00}^{(tw)}[J_f, J_f]} = \cos \theta_c \mathcal{A}_1; \\ \mathcal{A}_2^{(tw)} &= \frac{\rho_{20}^{(tw)}[J_f, J_f]}{\rho_{00}^{(tw)}[J_f, J_f]} = \left( \frac{3 \cos^2 \theta_c - 1}{2} \right) \mathcal{A}_2. \\ \mathcal{A}_{2\pm 2}^{(tw)} &= \cos^4(\theta_c/2) \mathcal{A}_{2\pm 2} \end{aligned}$$

ориентация фотоиона падает с углом конуса  $\theta_c$  медленнее, чем выстроенность

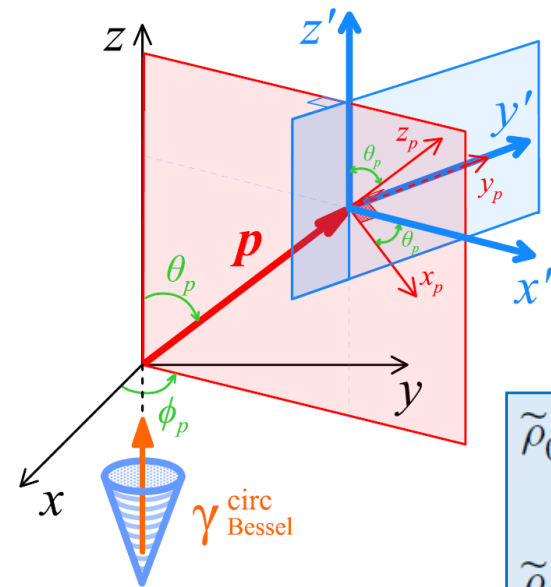
**Получены выражения** для стат. тензоров фотоэлектрона

**при циркулярной и линейной** поляризации падающего бесселева пучка

**в собственной системе отсчёта фотоэлектрона и в лабораторной системе отсчёта.**

# Циркулярно поляризованный бесселев пучок (дипольное приближение)

$$\tilde{\rho}_{k'q'}[j, j'] = \delta_{kk'} \sum_q \rho_{kq}[j, j'] D_{qq'}^{k*}(\omega)$$



$$\rho_{00}^{(tw)} = \frac{1}{\sqrt{3}} B[0, 0, 0] + \frac{1}{\sqrt{6}} P_2(\cos \theta_p) P_2(\cos \theta_c) B[2, 0, 2]$$

$$\rho_{10}^{(tw)} = \frac{\pm 1}{\sqrt{2}} \cos \theta_p \cos \theta_c \left( B[0, 1, 1] - \sqrt{\frac{2}{5}} B[2, 1, 1] \right)$$

$$\rho_{11}^{(tw)} = -\frac{1}{2} \sin \theta_p \left\{ \mp \cos \theta_c \left( B[0, 1, 1] + \frac{1}{\sqrt{10}} B[2, 1, 1] \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \theta_p P_2(\cos \theta_c) B[2, 1, 2] \right\}$$

$$\tilde{\rho}_{00}^{(tw)} = \rho_{00}^{(tw)}$$

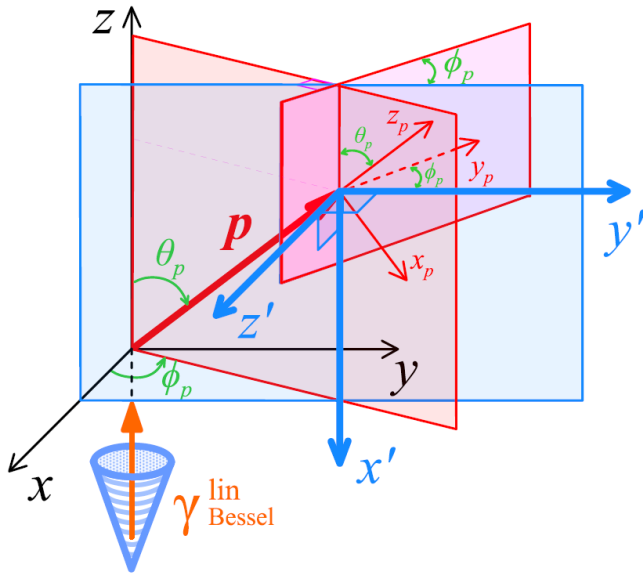
$$\tilde{\rho}_{10}^{(tw)} = \pm \frac{\cos \theta_c}{\sqrt{2}} \left( B[0, 1, 1] - \sqrt{\frac{2}{5}} B[2, 1, 1] P_2(\cos \theta_p) \right)$$

$$\tilde{\rho}_{11}^{(tw)} = \pm \frac{\sin \theta_p \cos \theta_p}{2\sqrt{2}} \left( \frac{3}{\sqrt{5}} \cos \theta_c B[2, 1, 1] \mp i P_2(\cos \theta_c) \text{Im} B[2, 1, 2] \right)$$

# Линейно поляризованный бесселев пучок (дипольное приближение)

$$\rho_{00}^{(tw)} = \frac{1}{\sqrt{3}}B[0, 0, 0] + \frac{1}{\sqrt{6}}B[2, 0, 2] \left\{ 1 - 3 \sin^2 \theta_p \cos^2 \phi_p - 6 \sin^2(\theta_c/2)(\cos^2 \theta_p - \sin^2 \theta_p \cos^2 \phi_p) + \frac{3}{2} \sin^4(\theta_c/2)(5 \cos^2 \theta_p - 1 - 2 \sin^2 \theta_p \cos^2 \phi_p) \right\}$$

$$\rho_{11}^{(tw)} = -\frac{1}{\sqrt{2}}B[2, 1, 2] \sin \theta_p \left\{ \cos \theta_p \cos^2 \phi_p + i \cos \phi_p \sin \phi_p - 2 \sin^2(\theta_c/2)(\cos \theta_p(1 + \cos^2 \phi_p) + i \cos \phi_p \sin \phi_p) + \sin^4(\theta_c/2) \left( \cos \theta_p \left( \frac{5}{2} + \cos^2 \phi_p \right) + i \cos \phi_p \sin \phi_p \right) \right\}.$$



$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_{00}^{(tw)} &= \rho_{00}^{(tw)} \\ \tilde{\rho}_{10}^{(tw)} &= \frac{\cos \theta_p \sin \theta_p \sin \phi_p}{2} \text{Im}B[2, 1, 2] \sin^2 \frac{\theta_c}{2} \left( 5 \sin^2 \frac{\theta_c}{2} - 4 \right) \\ \tilde{\rho}_{11}^{(tw)} &= \frac{\sin \theta_p \cos \phi_p}{\sqrt{2}} \text{Im}B[2, 1, 2] \left\{ \sin \theta_p \sin \phi_p \cos^4 \frac{\theta_c}{2} - i \cos \theta_p \left( 1 - 4 \sin^2 \frac{\theta_c}{2} + \frac{7}{2} \sin^4 \frac{\theta_c}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$