

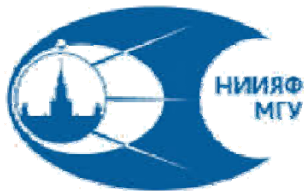
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ АТТОСЕКУНДНОЙ МЕТРОЛОГИИ

Елена Владимировна Грызлова

М.М. Попова , С.Н. Юдин , А.Н. Грум-Гржимайло

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics

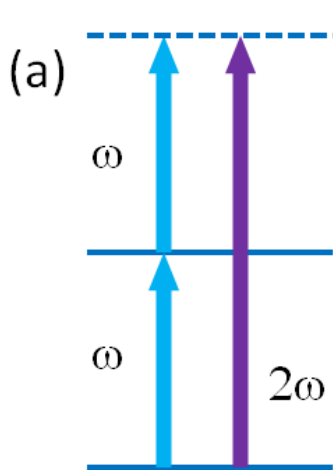
Lomonosov Moscow State University



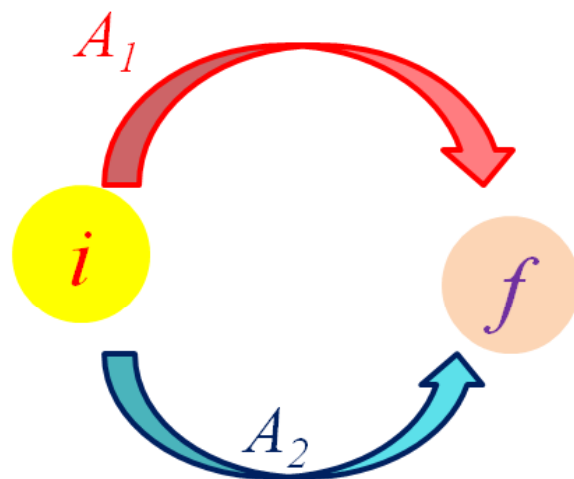
НИИЯФ МГУ

Март 12, Москва

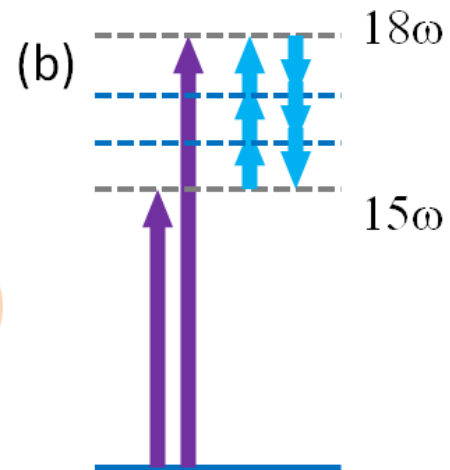
Схемы аттосекундной метрологии



Бихроматическая ионизация



RABBITT reconstruction of atto second beating in two-photon transition

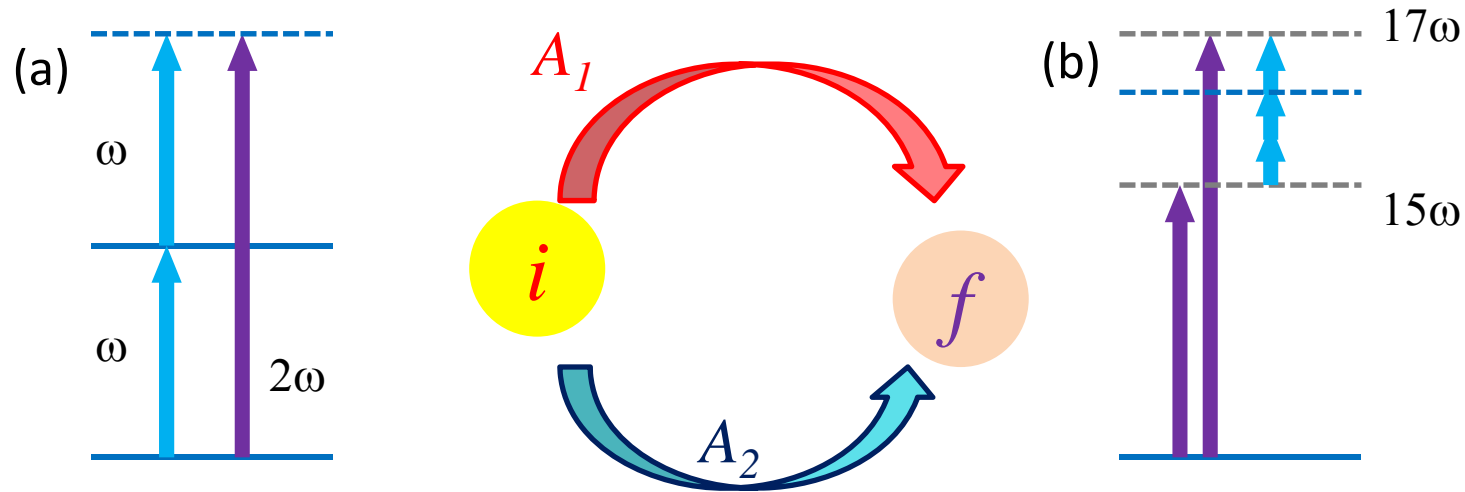


$$\omega \sim 1 \text{ eV}, \quad \delta t \sim 10^{-15} \text{ c (фемто)}$$



$$\omega \sim 10 \text{ eV}, \quad \delta t \sim 10^{-16} \text{ c (субфемто)}$$

~ 1980-1985



Dislocations of the wave-front surface and zeros of the amplitude

N. B. Baranova and B. Ya. Zel'dovich

P. N. Lebedev Institute of Physics, Academy of Sciences of the USSR
(Submitted 12 November 1980)
Zh. Eksp. Teor. Fiz. **80**, 1789–1797 (May 1981)

The distribution of the complex amplitude of a monochromatic field of complicated structure is discussed in relation to the existence of points where the amplitude is equal to zero. For a uniformly polarized field the "carrier" of a zero is in general a continuous line in three-dimensional space. On this line the wave front (surface of constant phase) has a screw dislocation. Solutions are found of the parabolic wave equations that describes the behavior of the amplitude near an isolated zero-line, and also near the place where a pair of zero-lines is created or annihilated. The statistical average of the number of zeros per unit area of wave front is found for a speckle-nonuniform field with Gaussian statistics. The use of flexible mirrors in the coherent optical adaptive technique (COAT technique) to transform nonuniform beams and reverse their wave fronts is discussed.

Multiply Charged Ions Formed by Multiphoton Absorption Processes in the Continuum

A. L'Huillier, L. A. Lompre, G. Mainfray, and C. Manus

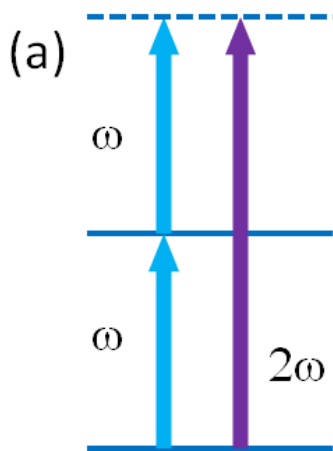
Service de Physique des Atomes et des Surfaces, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, F-91191
Gif-sur-Yvette Cedex, France

(Received 12 March 1982)

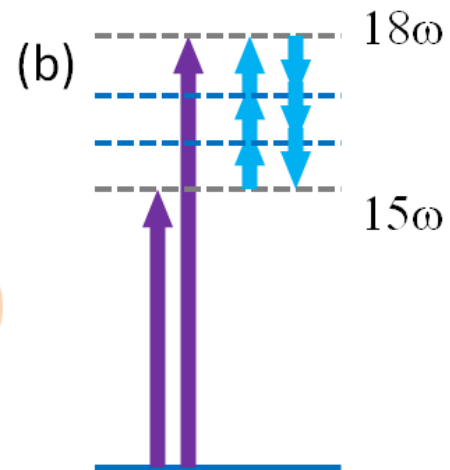
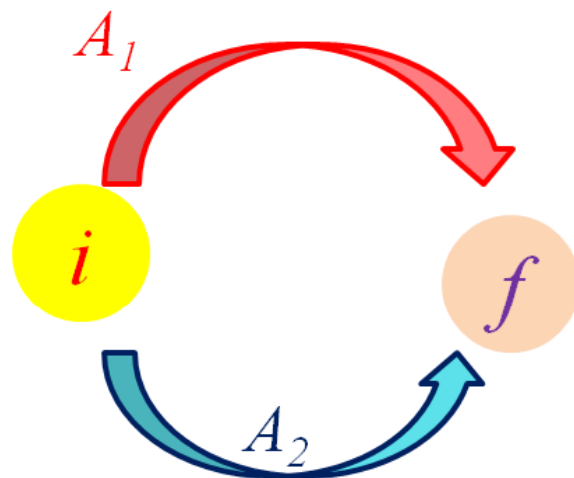
Singly, doubly, triply, and quadruply charged krypton ions are formed by multiphoton absorption processes in krypton atoms. They are induced by a 50-psec laser pulse at $1.064 \mu\text{m}$ in the 10^{13} – 10^{14} - $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ intensity range. The percentage ratio between the numbers of doubly and singly ionized Kr atoms is 10% at $8 \times 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$. It is shown that Kr^{2+} ions result from a direct 33-photon absorption process. At $1.5 \times 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$, the 33-photon absorption rate is only about 60 times less than the 13-photon absorption rate which gives singly charged ions.

Нечетные кратные гармоники $3\omega, 5\omega, \dots$

Схемы аттосекундной метрологии

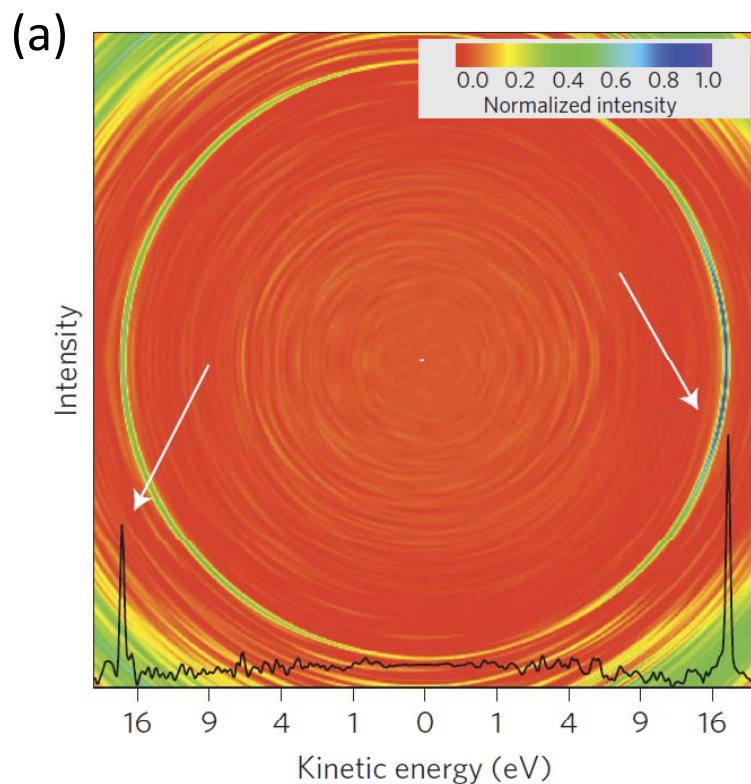
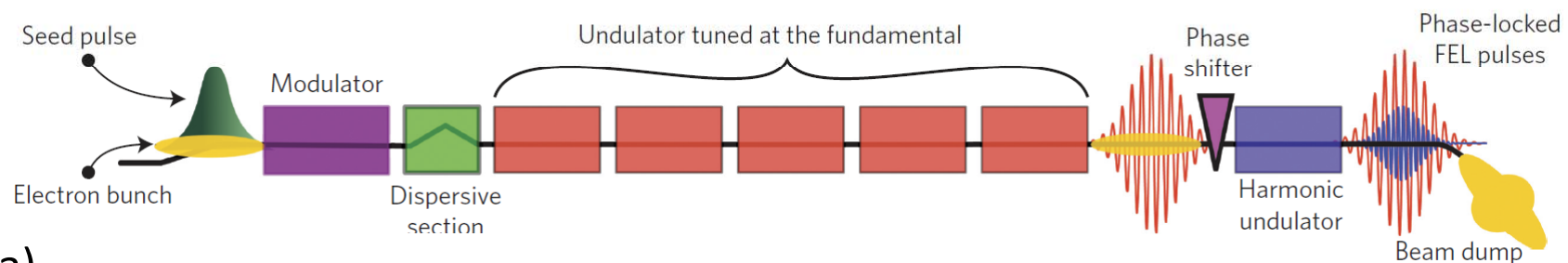


Бихроматическая ионизация



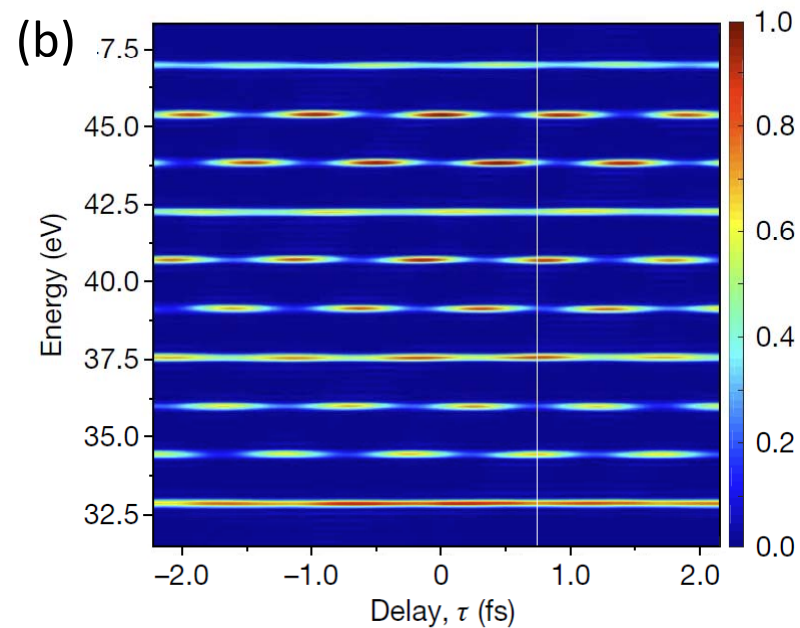
RABBITT reconstruction of atto second beating in two-photon transition

Схемы аттосекундной метрологии



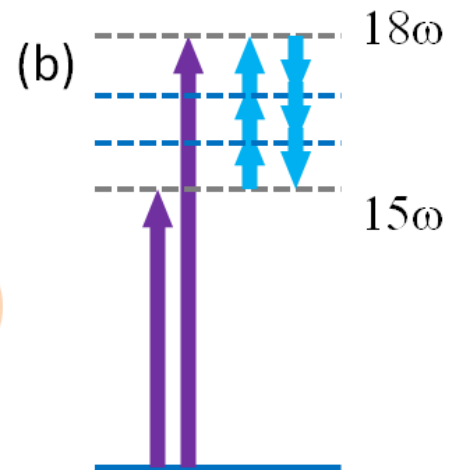
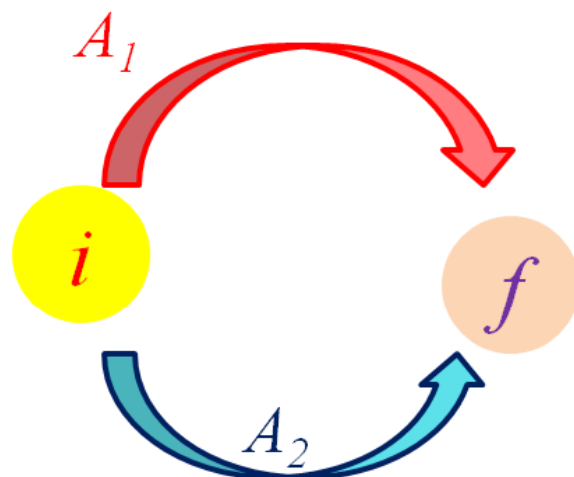
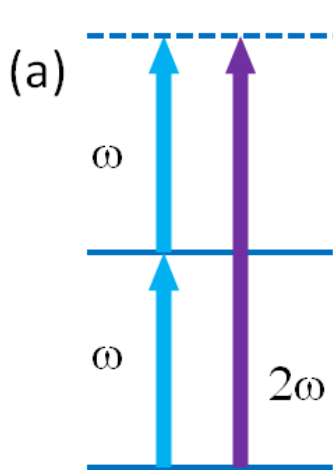
Nature Photonics .10, 176-179 (2018).

Развертка в определенном направлении



Nature, 578, 386-391 (2020).

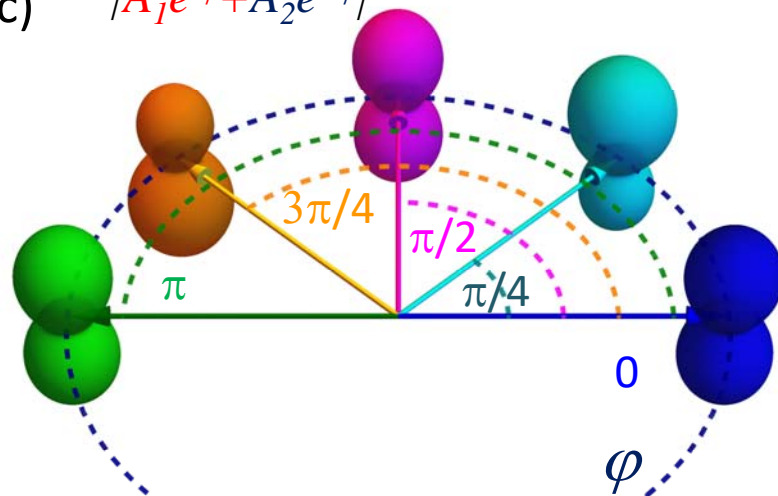
Схемы аттосекундной метрологии



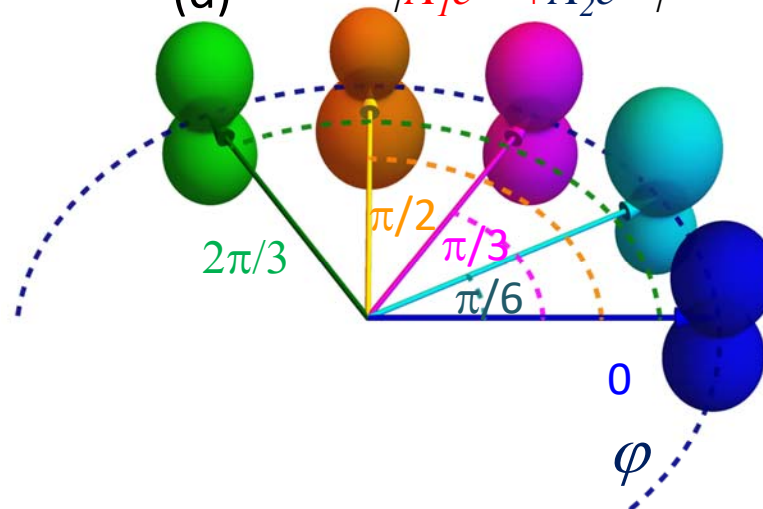
Бихроматическая ионизация

RABBITT reconstruction of atto second

(c) $|A_1 e^{i\varphi} + A_2 e^{-i\varphi}|^2$



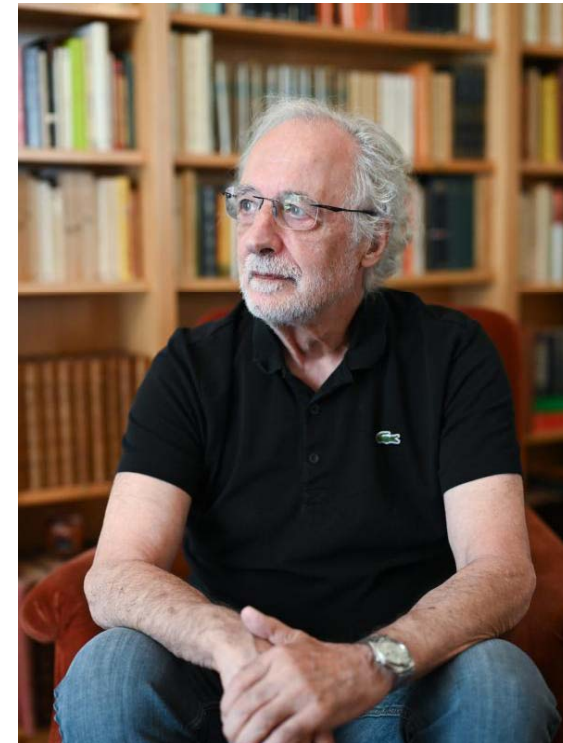
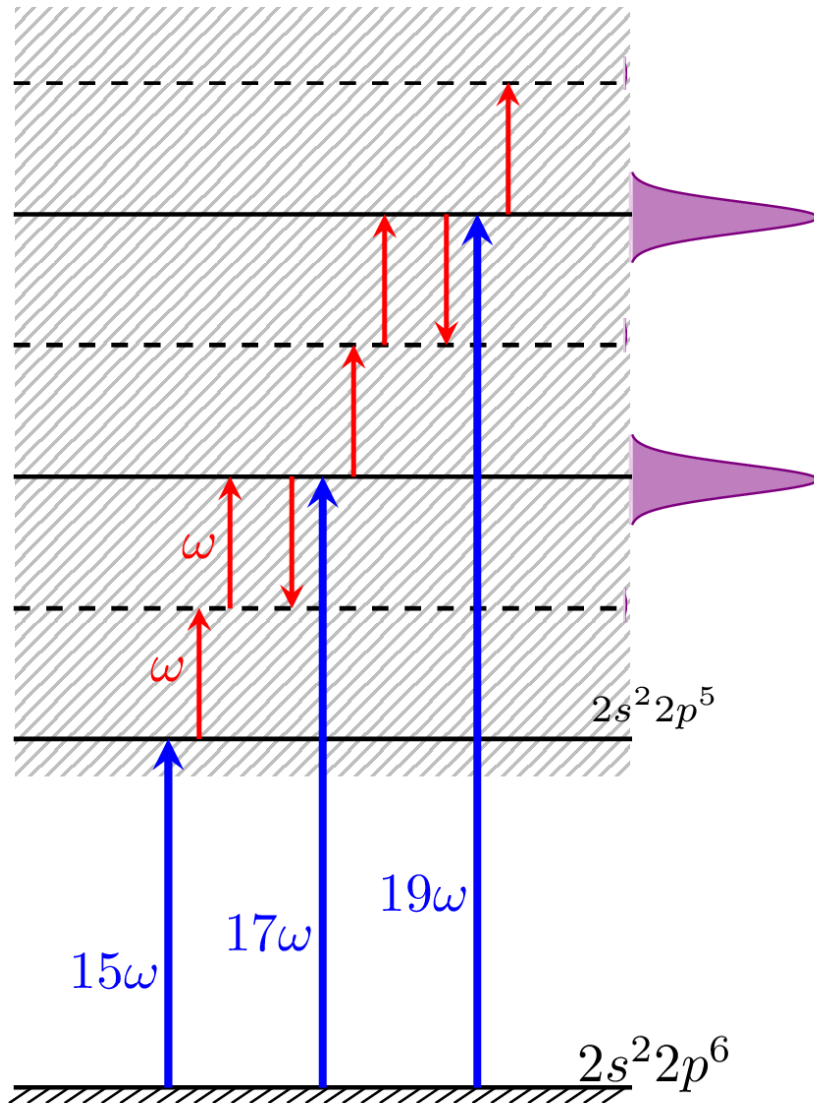
(d) $|A_1 e^{2i\varphi} + A_2 e^{-i\varphi}|^2$



Nature Photonics .10, 176-179 (2018).

Nature, 578, 386-391 (2020).

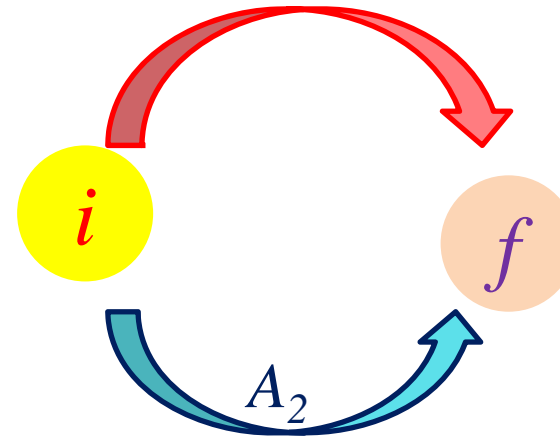
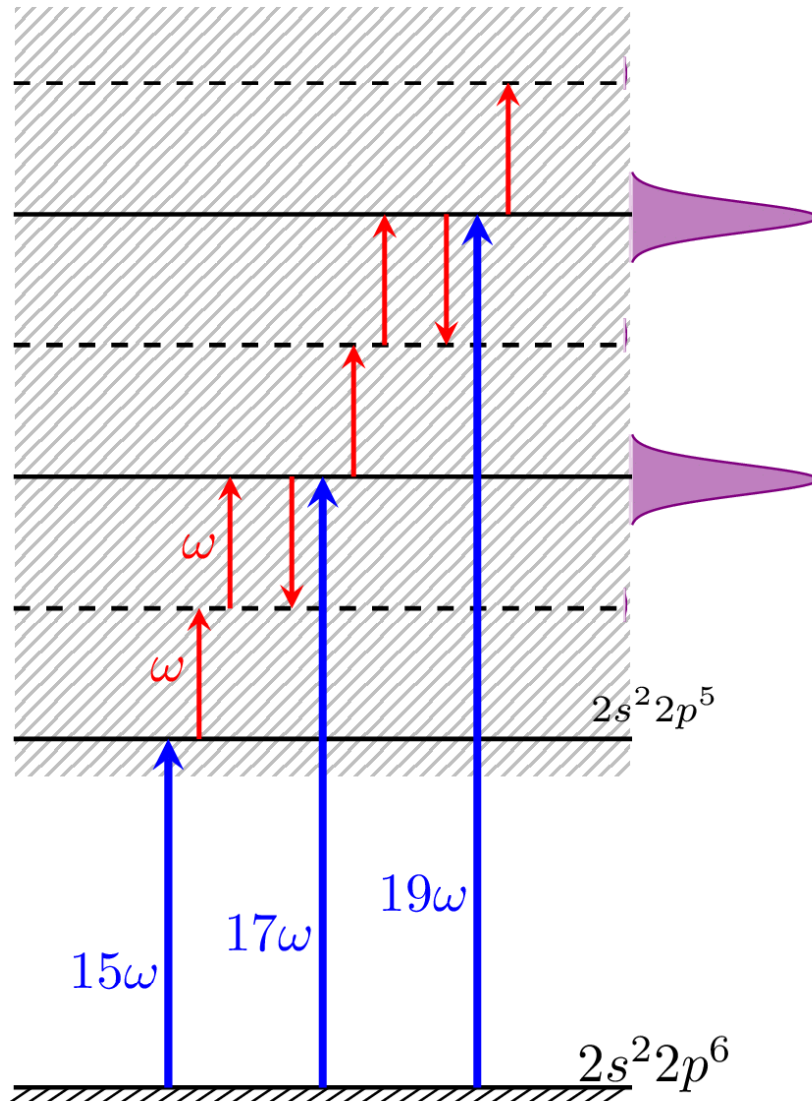
RABBIT спектроскопия



В 1994 Пьер Агостини (Pierre Agostini) предложил метод, позволяющий характеризовать импульсы электромагнитного излучения с аттосекундной точностью.

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

RABBIT спектроскопия



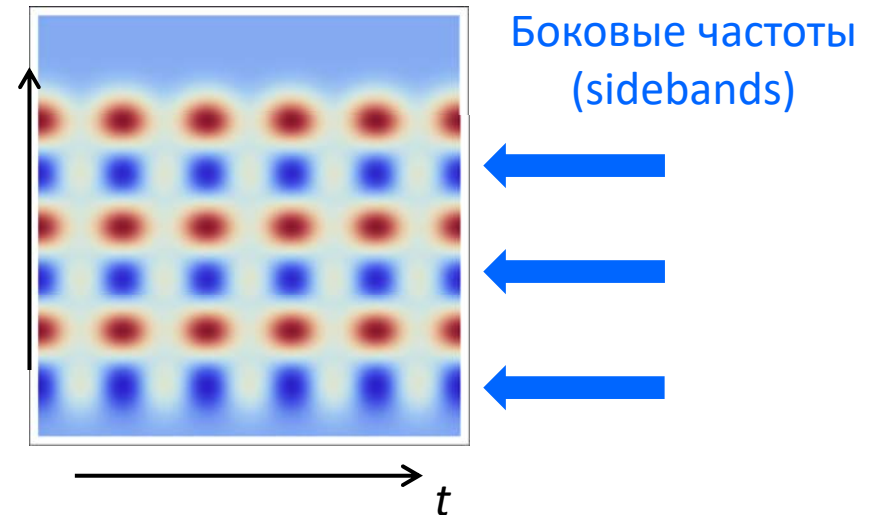
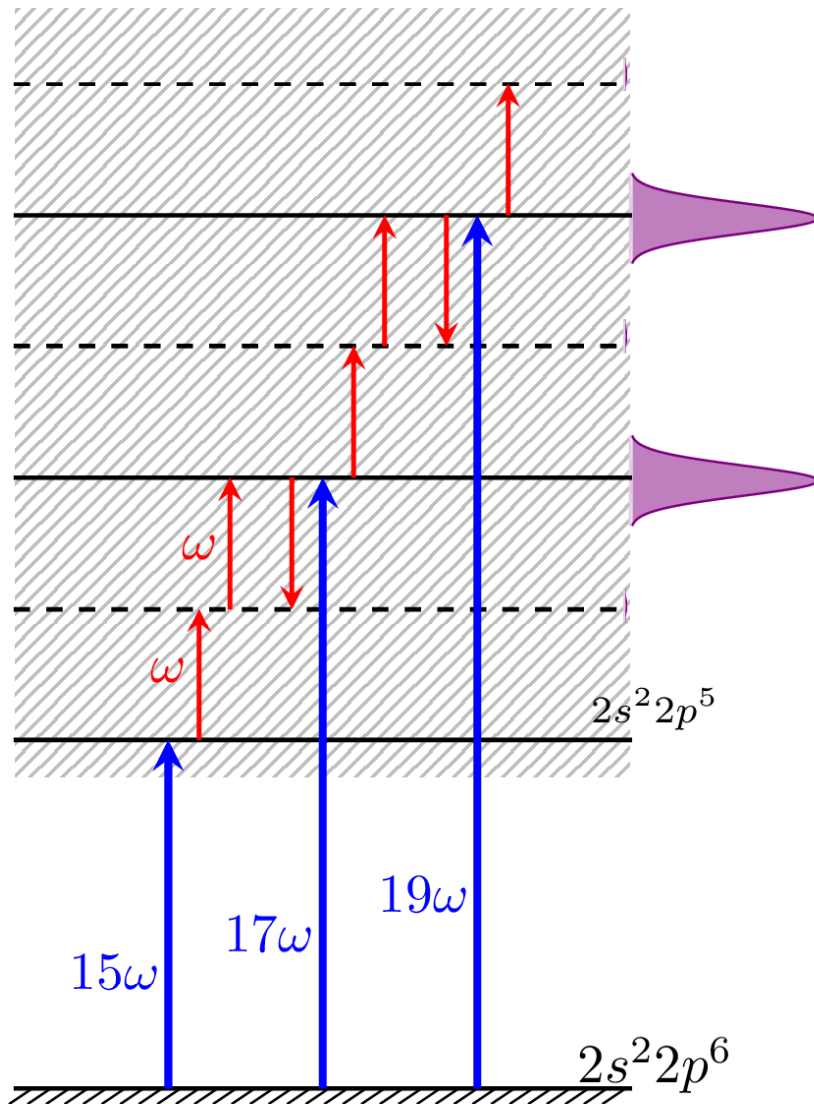
$$|A_1 e^{i\phi} + A_2 e^{-i\phi}|^2$$

$$\alpha + \beta \cos 2\phi$$

В 1994 Пьер Агостини (Pierre Agostini) предложил метод, позволяющий характеризовать импульсы электромагнитного излучения с аттосекундной точностью.

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

RABBIT спектроскопия

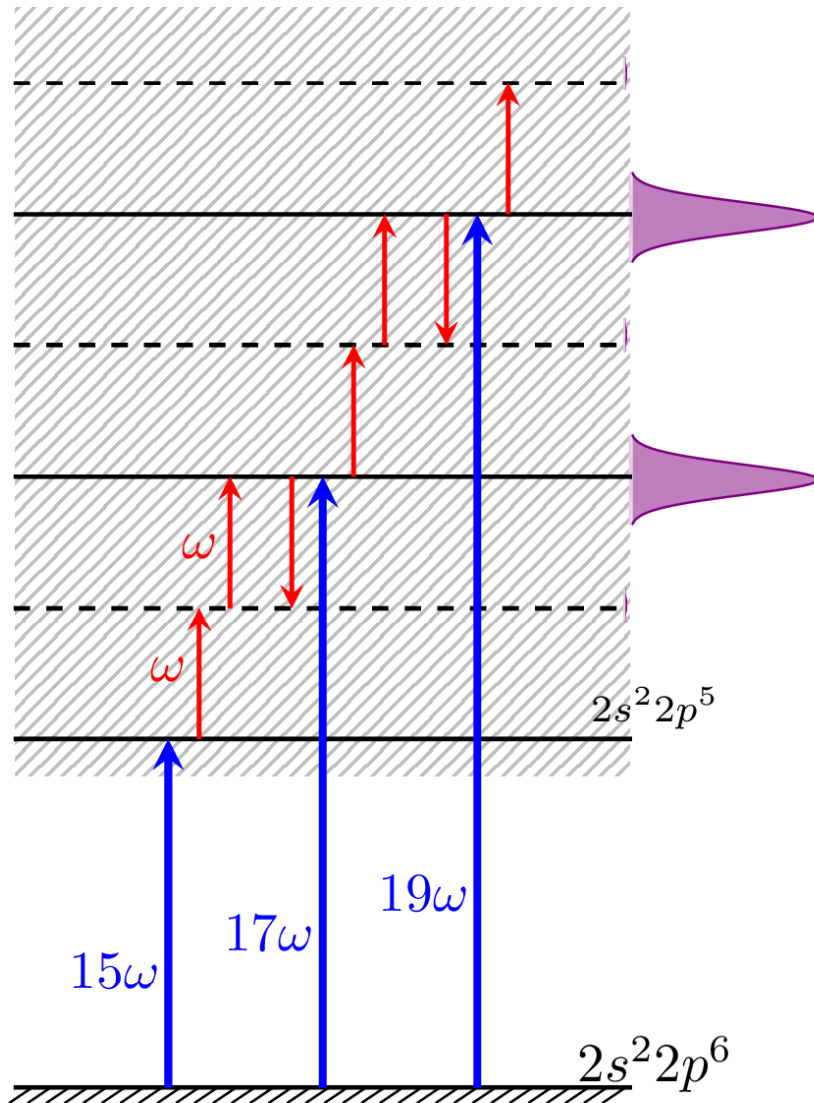


$$\alpha + \beta \cos(2\omega\tau)$$

Интерференция путей перехода с поглощением и испусканием ИК-фотона вызывает осцилляции в интегральной вероятности фотоэмиссии

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

RABBIT спектроскопия

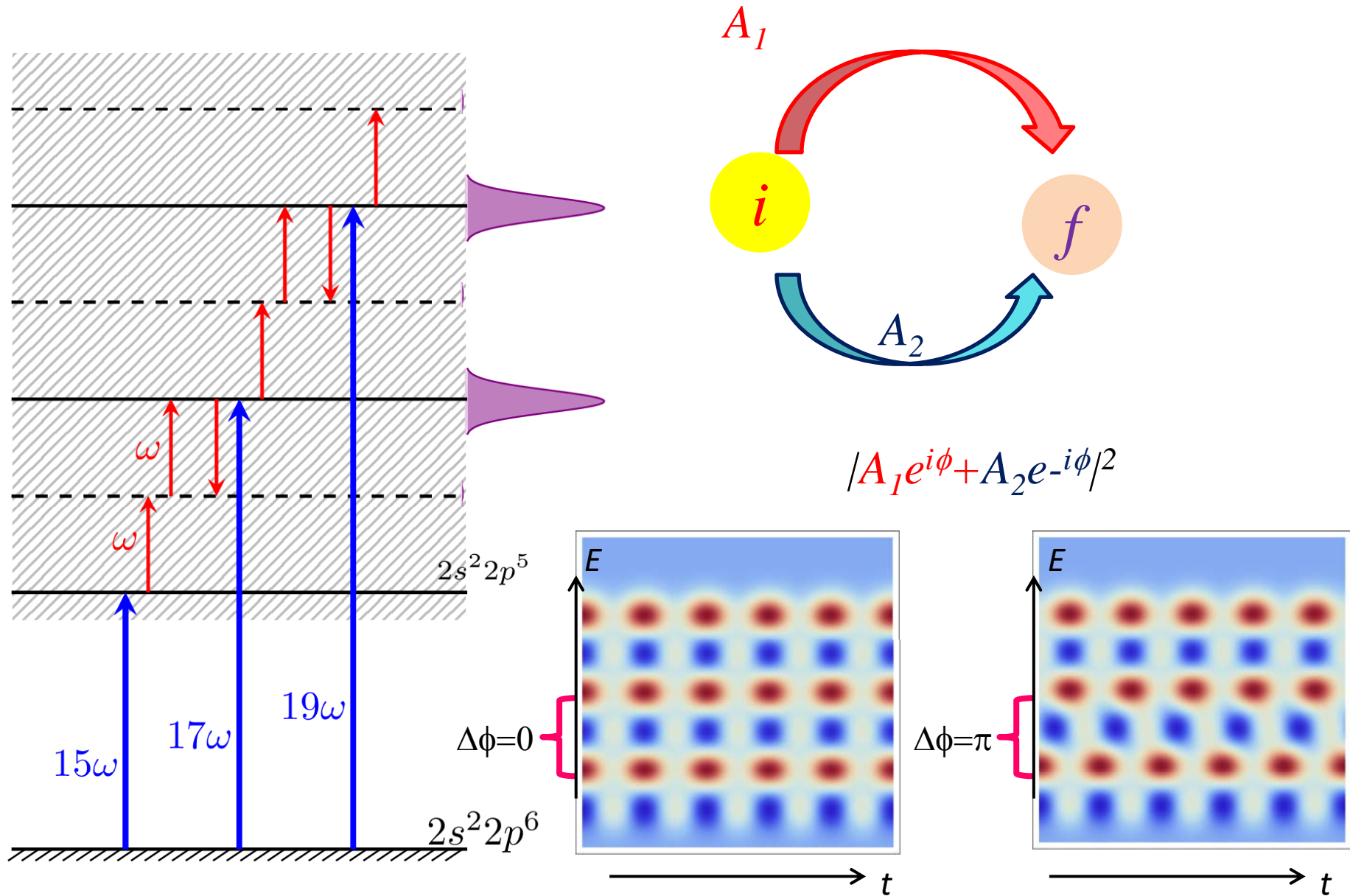


$$\alpha + \beta \cos(2\omega\tau)$$

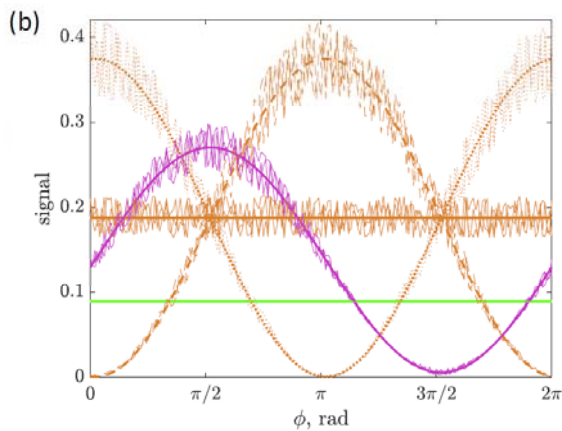
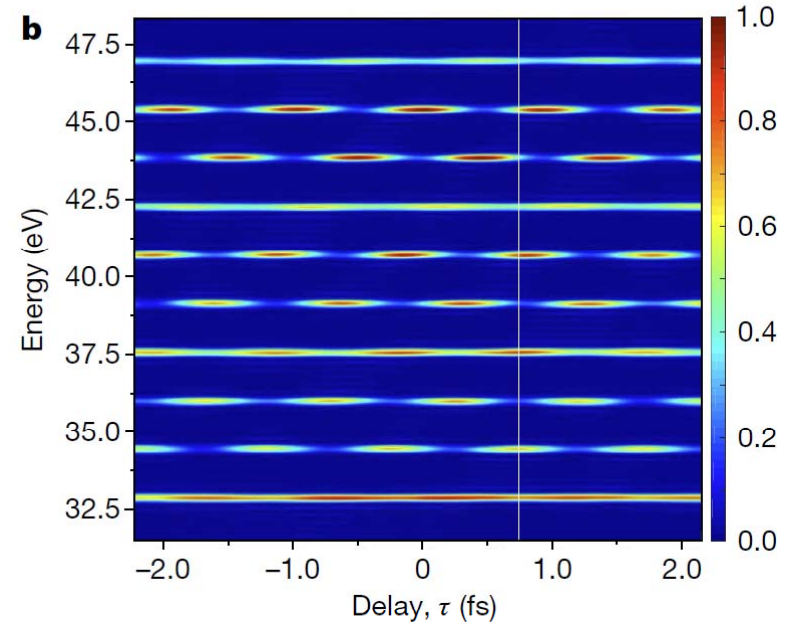
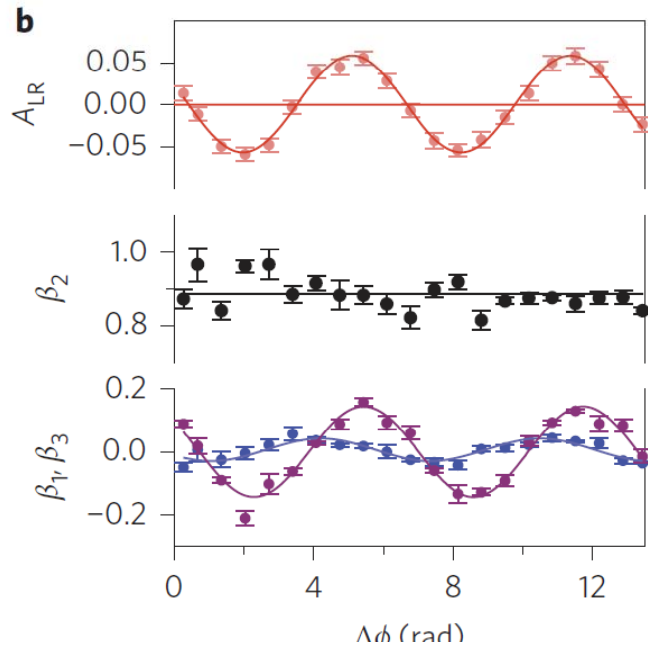
Интерференция путей перехода с поглощением и испусканием ИК-фотона вызывает осцилляции в интегральной вероятности фотоэмиссии

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

Определение фазы гармоники



Мотивация



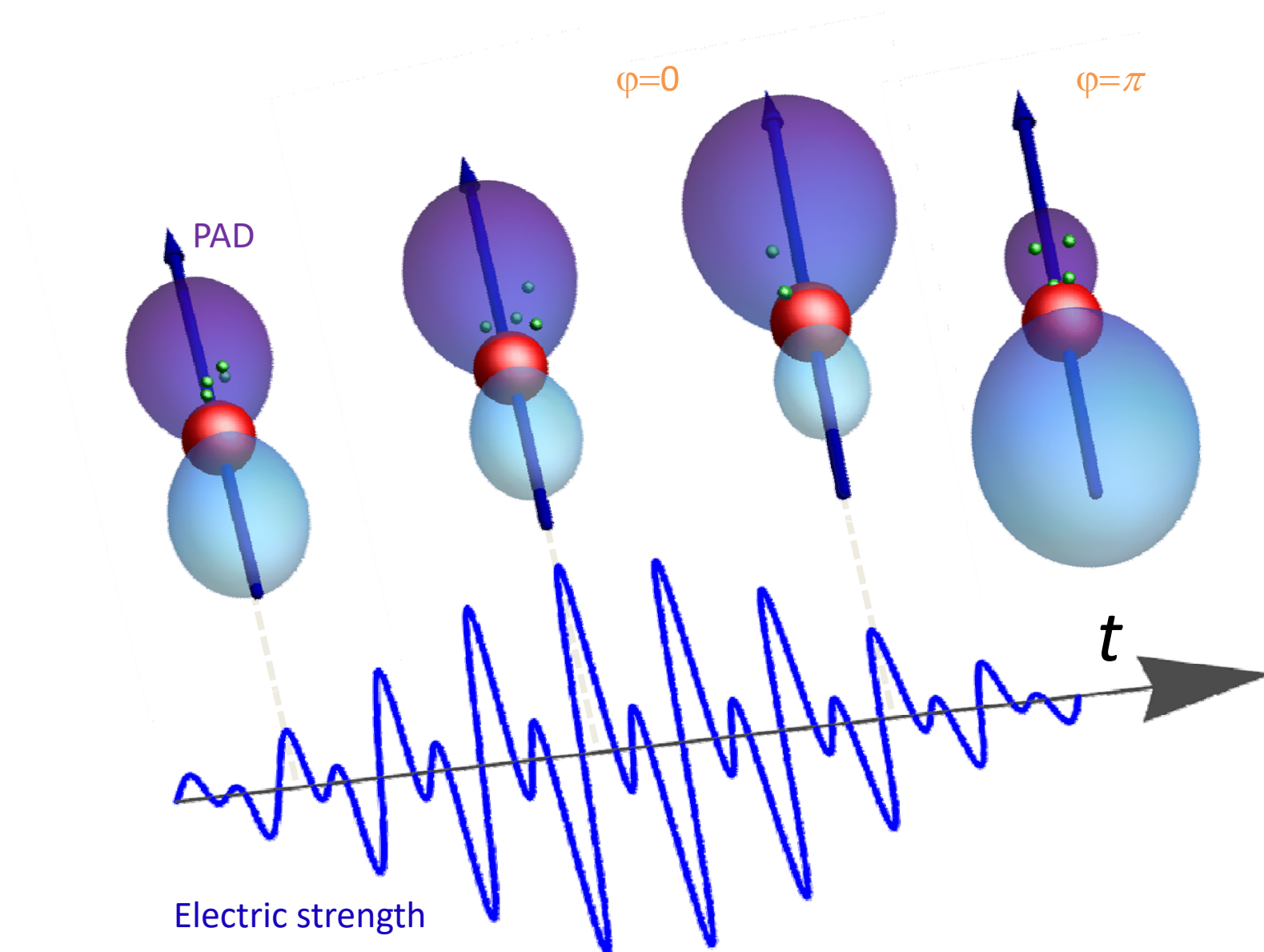
Смешивание четности позволяет исключить случайные осцилляции

Проявляется в угловом распределении, причем в нарушении симметрии

Основные положения метода

- Дипольное приближение
- Решение нестационарного УШ с разложением по базису невозмущенного атомного гамильтониана+ Нестационарная теория возмущений
- Аналитические выражения для интегральных и дифференциальных по углу вероятностей фотоэмиссии получаются в терминах приведенных амплитуд с использованием алгебры углового момента
- Расчеты амплитуд выполняются в MCHF

Formation of the asymmetry



Параметры электромагнитного импульса

$$E = E_1(t) \vec{\varepsilon}_1 \cos \omega t + E_2(t) \vec{\varepsilon}_2 \cos(2\omega t + \varphi)$$

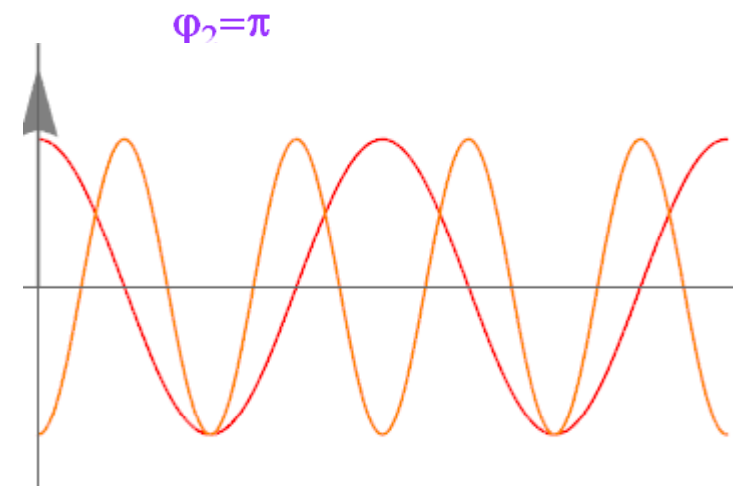
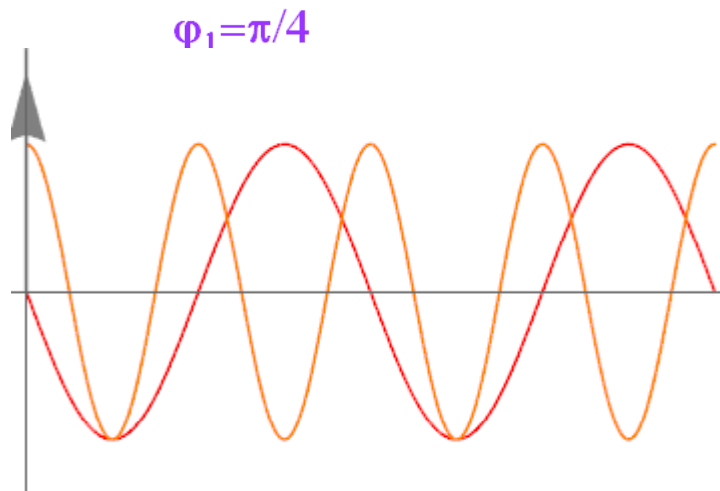
Pulse duration
Intensity

envelope

Polarization

Relative phase

$-\varphi$ в первой гармонике не эквивалентно $+\varphi$ во второй \rightarrow
Физически зафиксирован интервал времени между максимумами



Параметры электромагнитного импульса

$$E = E_1(t) \vec{\varepsilon}_1 \cos \omega t + E_2(t) \vec{\varepsilon}_2 \cos (2\omega t + \varphi)$$

Pulse duration
Intensity
Form

envelope

Polarization

Relative phase

$-\varphi$ в первой гармонике не эквивалентно $+\varphi$ во второй →
Физически зафиксирован интервал времени между максимумами

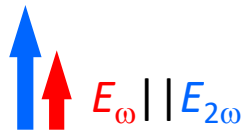
Когерентный контроль \equiv фазовый контроль

Какой физический смысл имеет фаза при различных поляризациях?

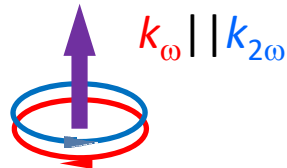
Симметрия поля и углового распределения

$$E = E_1(t) \vec{\varepsilon}_1 \cos \omega t + E_2(t) \vec{\varepsilon}_2 \cos(2\omega t + \varphi)$$

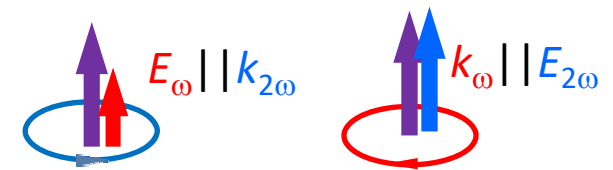
Линейная
поляризация



Круговая
поляризация



Круговая + линейная
поляризация



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



Физический смысл фазы

$$E = E_1(t) \vec{\varepsilon}_1 \cos \omega t + E_2(t) \vec{\varepsilon}_2 \cos(2\omega t + \varphi)$$

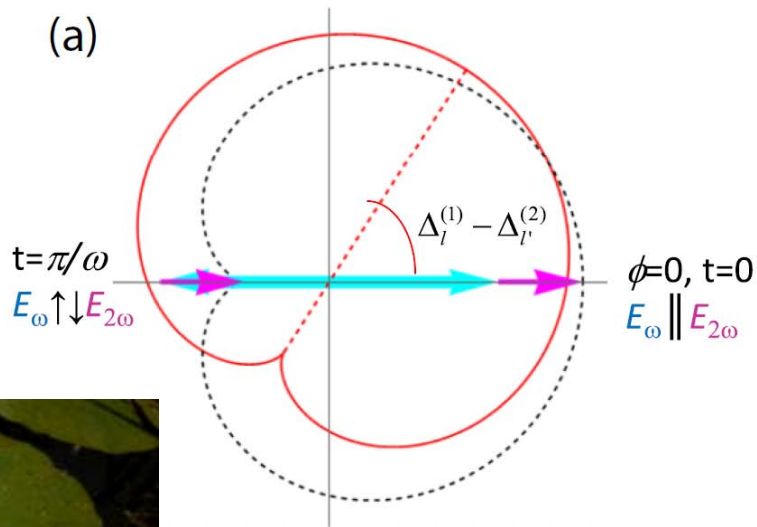
Pulse duration
Intensity

envelope

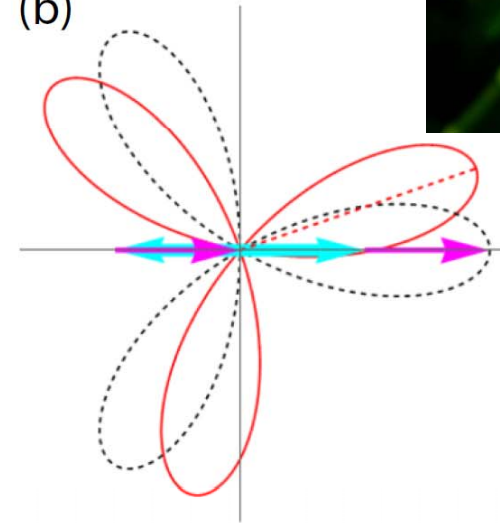
Polarization

Relative phase

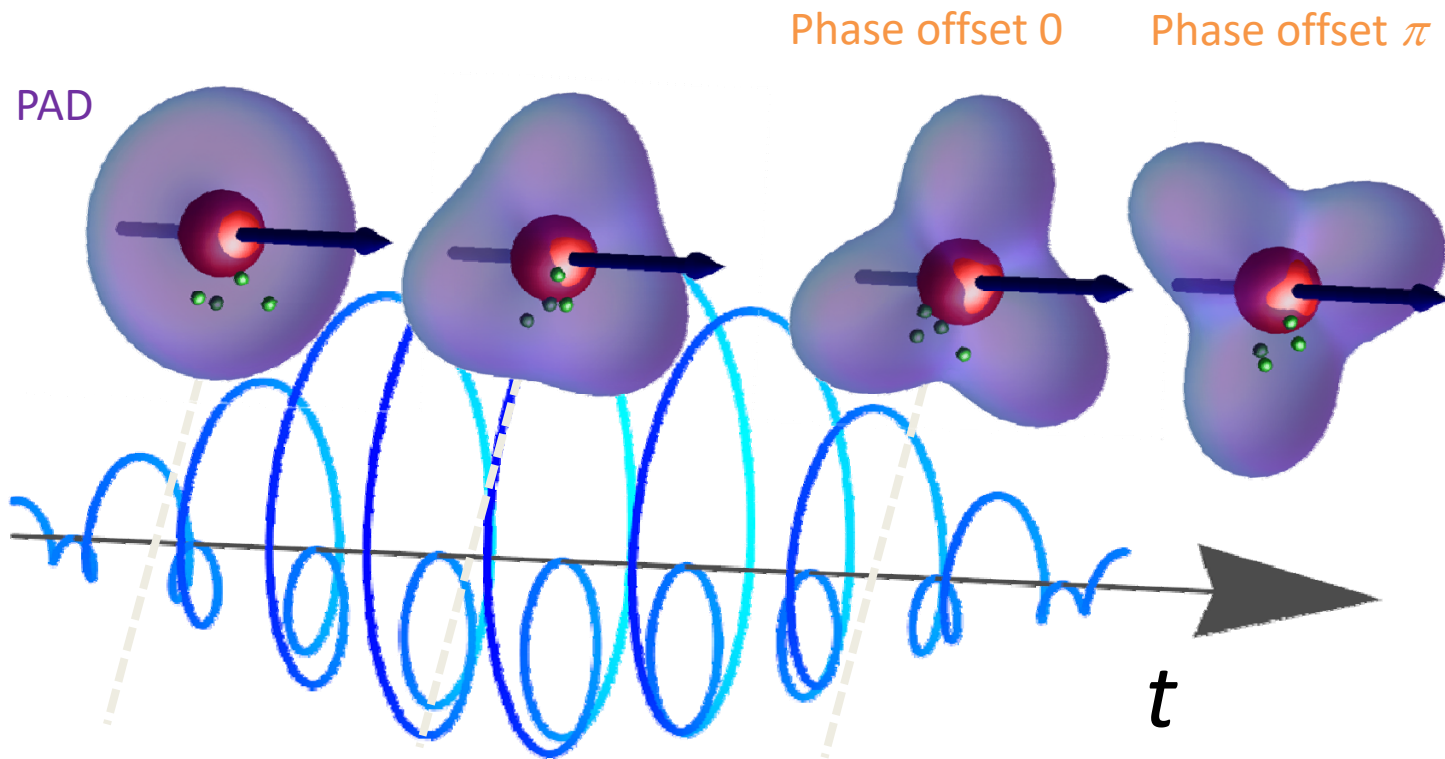
(a)



(b)



Formation of the asymmetry



Electric strength

Физический смысл фазы

Для линейно поляризованных полей – **сдвиг по времени между экстремумами (изменение куба напряженности)**

Для полей с круговой поляризацией в одной плоскости - **направление напряженности поля в тот момент когда они сонаправлены**

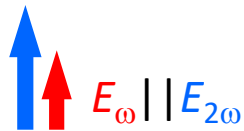
Для комбинации поля круговой поляризации и поля линейно поляризованного в перпендикулярном направлении – **направление круговой компоненты в тот момент, когда линейная достигает максимума**

Таким образом, можно ожидать нетривиального изменения критериев и условий реализации когерентного контроля при изменении поляризации

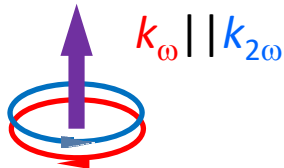
Симметрия поля и углового распределения

$$E = E_1(t) \vec{\varepsilon}_1 \cos \omega t + E_2(t) \vec{\varepsilon}_2 \cos(2\omega t + \varphi)$$

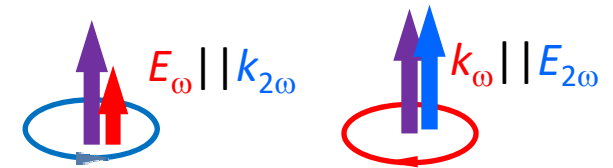
Линейная
поляризация



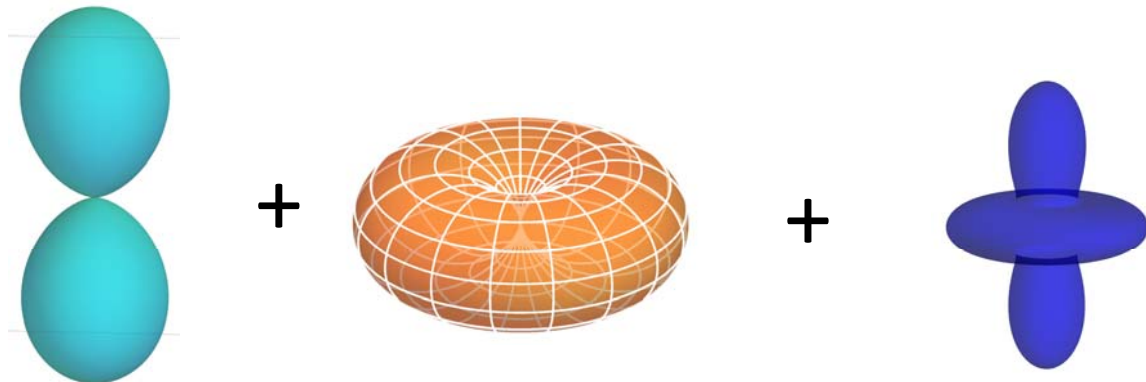
Круговая
поляризация



Круговая + линейная
поляризация



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

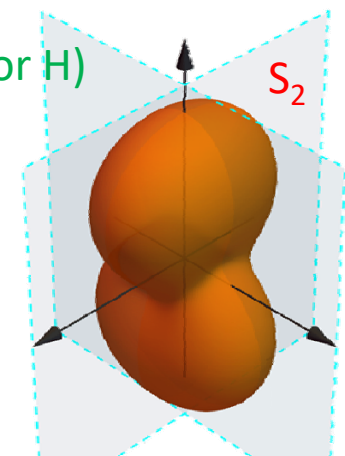
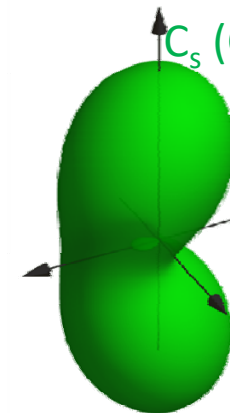
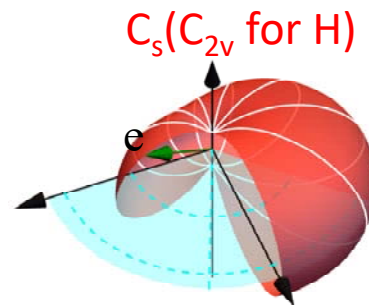
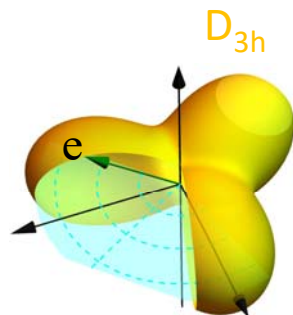
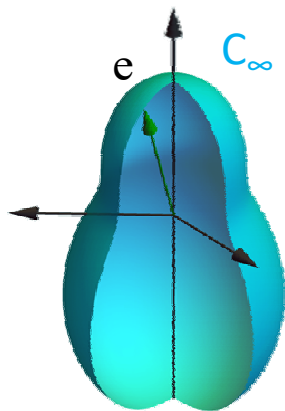
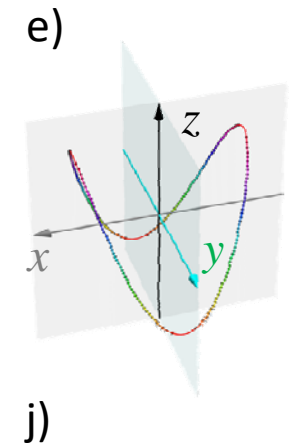
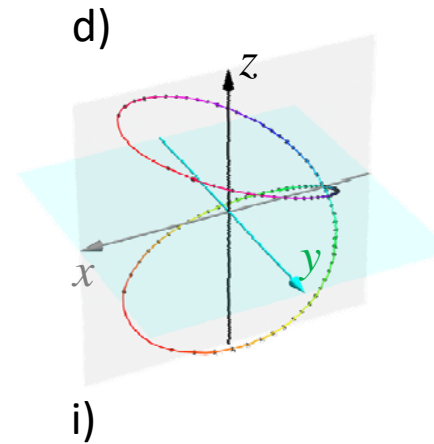
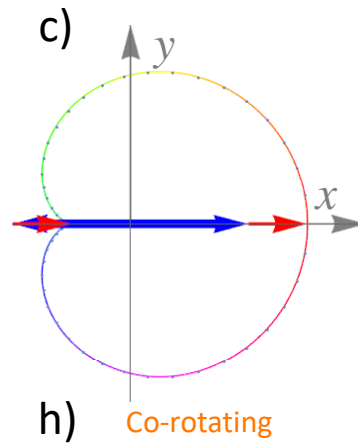
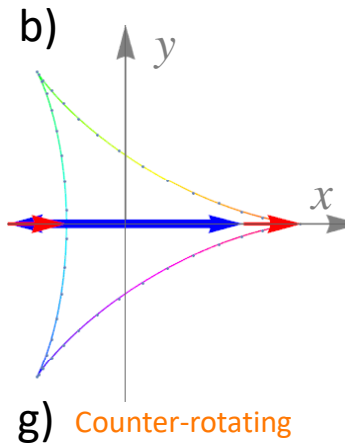
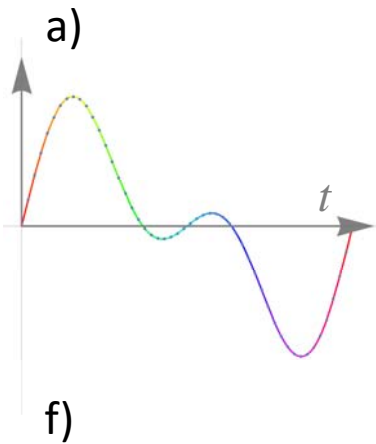
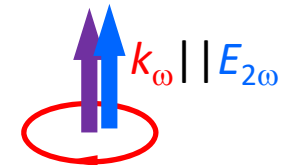
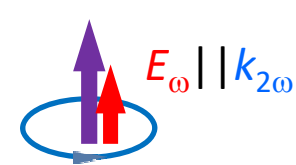
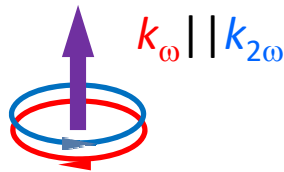
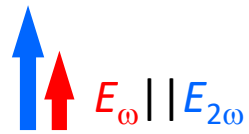


Симметрия поля и углового распределения

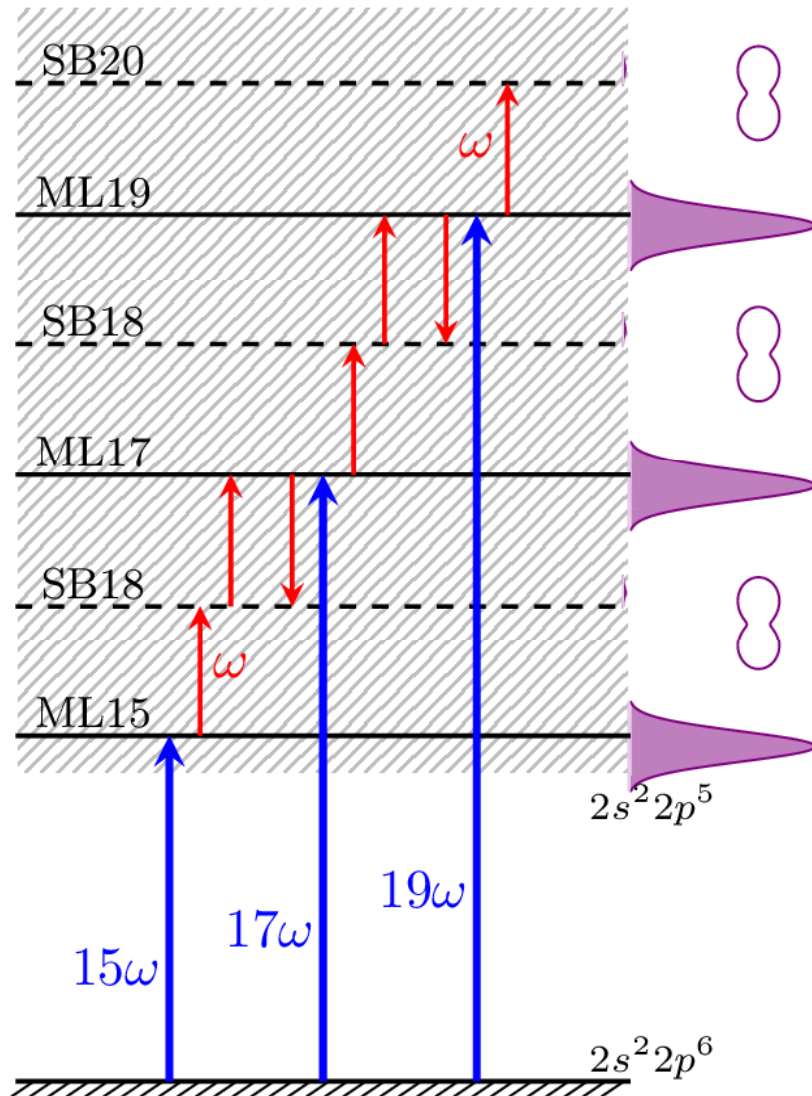
Linear polarization

Circular polarization

Combined circular and linear polarization



1SB RABBITT

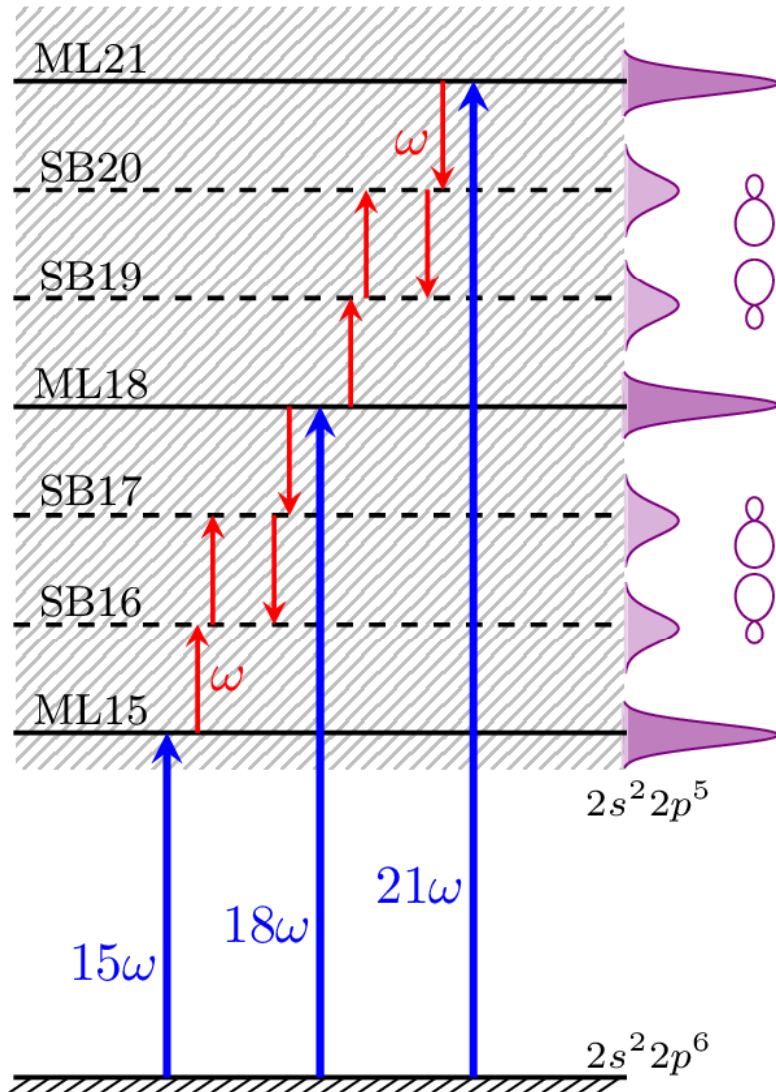


Advantages of polarization control in RABBITT

Popova M. M., Gryzlova E. V., Yudin S. i N.,
Grum-Grzhimailo A. N.

Physical Review A, и111, № 3 (2025)

2SB RABBITT



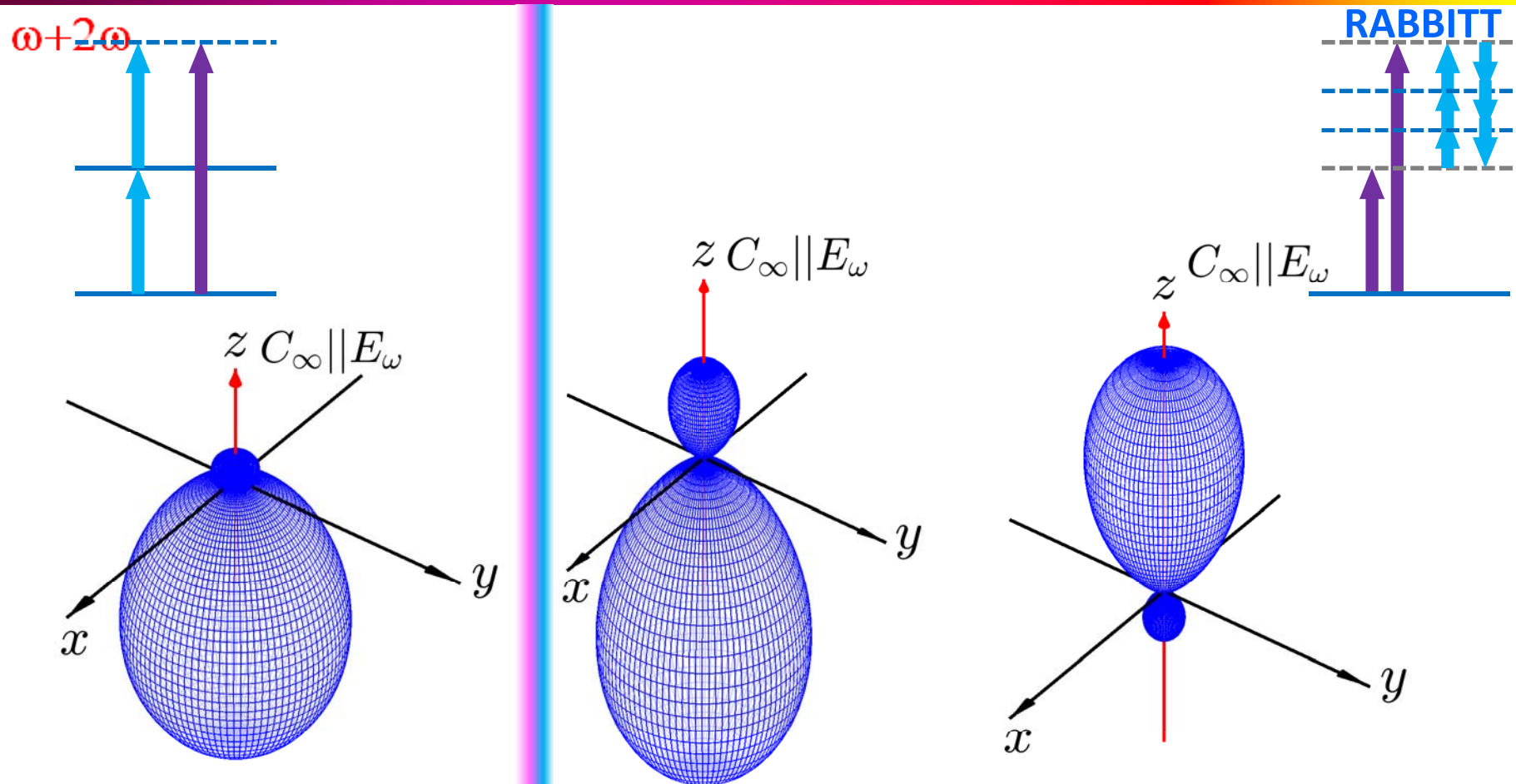
$\text{FWHM}=20 \text{ fs}$
 $\text{FWHM}_{\text{xUV}}=10 \text{ fs}$
 $E_{\text{ir}}=0.005/(2*\text{sqrt}(2));$
 $E_{\text{xUV}}=1. \text{e-}04/2;$
 $\Phi_{\text{xUV}}=0;$

PRA: General properties of the RABBITT at parity mixing conditions

Оптический журнал (ИТМО):

Поляризационные аспекты аттосекундной интерферометрии при смешивании состояний различной четности

Сонаправленные линейные поляризации



$$W^{\uparrow\uparrow}(\theta; \varepsilon) = \frac{W_0^{\uparrow\uparrow}}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=1, \dots, 6} \beta_k^{\uparrow\uparrow} P_k(\cos \theta) \right)$$

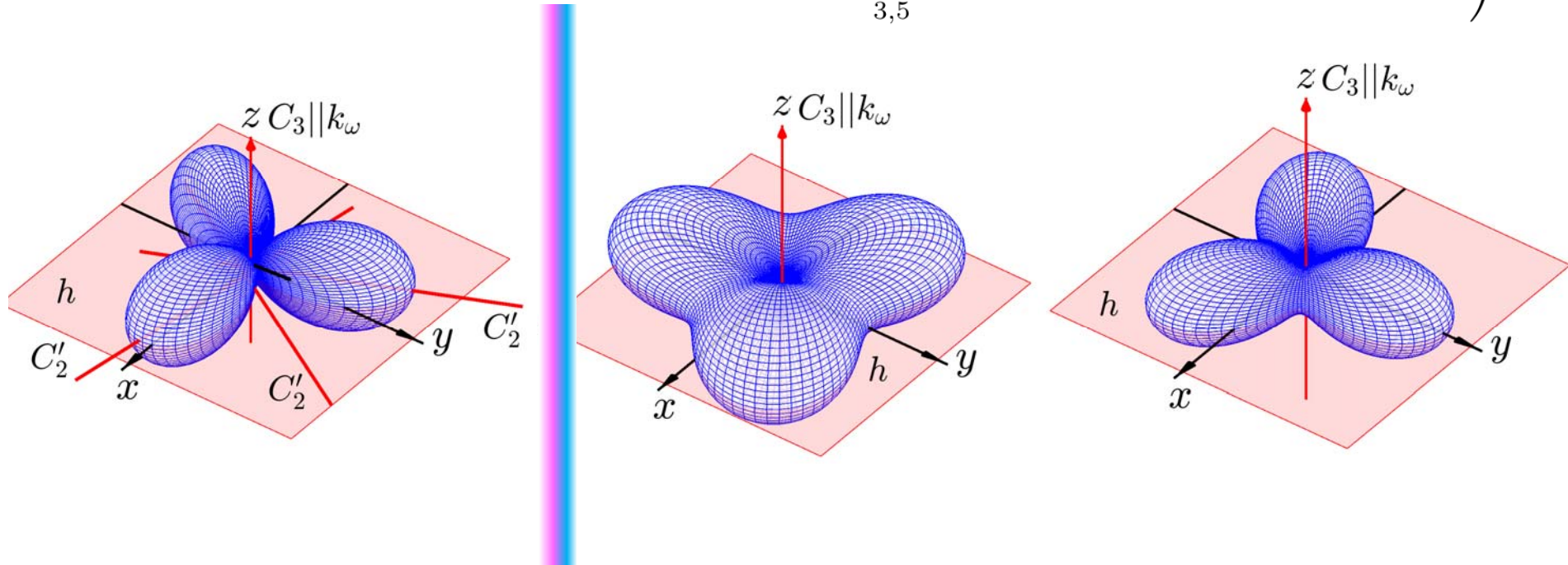
Та же симметрия и проявление когерентного контроля

Противоположные круговые поляризации

$\omega+2\omega$

$$\frac{dW^+}{d\Omega} = \frac{W_0}{4\pi} [1 + \beta_2^+ P_2(\cos \vartheta) + \beta_4^+ P_4(\cos \vartheta) + \beta_1^+ \sin \vartheta \cos(\varphi - \psi_1) - \beta_3^+ \sin^3 \vartheta \cos(\varphi - \psi_3)]$$

$$W^{\circ\circ}(\theta, \varphi; \varepsilon) = \frac{W_0^{\circ\circ}}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=2,4,6} \beta_k^{\circ\circ} P_k(\cos \theta) + \sum_{3,5} |\beta_{k3}^{\circ\circ}| P_k^3(\cos \theta) \cos(3\varphi - \arg[\beta_{k3}^{\circ\circ}]) \right). \quad (\text{RABBITT})$$



Небольшое понижение симметрии и тоже проявление когерентного контроля

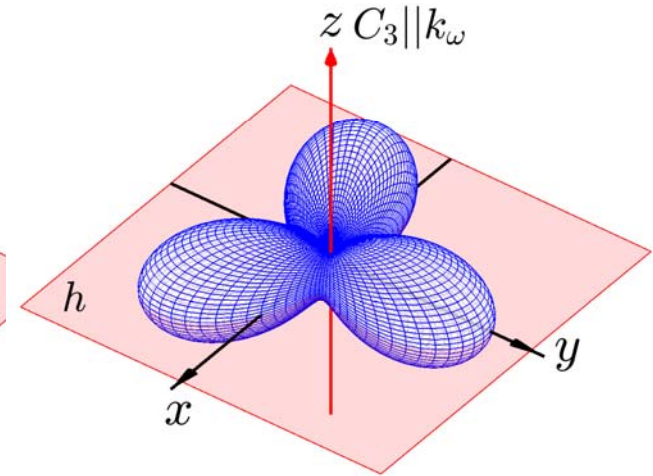
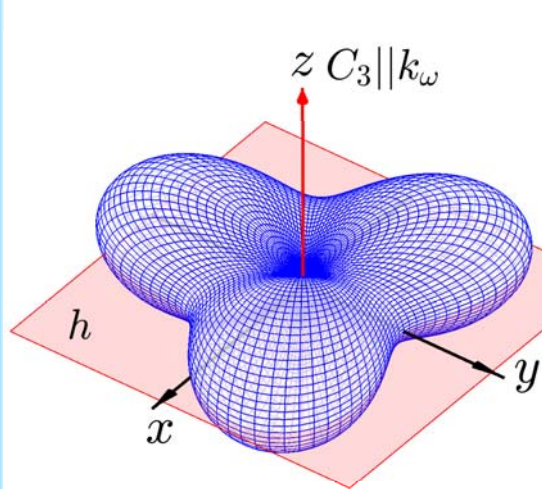
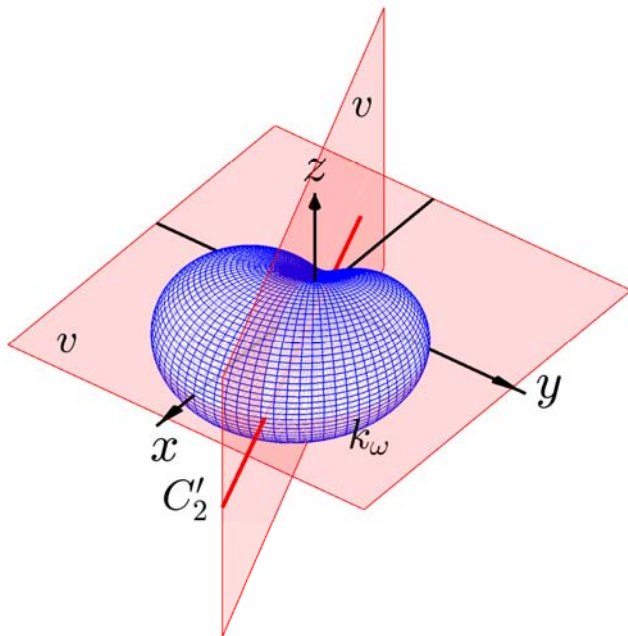
Одинаковые круговые поляризации

$\omega+2\omega$

RABBITT

$$\frac{dW^-}{d\Omega} = \frac{W_0}{4\pi} [1 + \beta_2^- P_2(\cos \vartheta) + \beta_4^- P_4(\cos \vartheta) + \beta_3^- \sin^3 \vartheta \cos(3\varphi - \psi_3)]$$

$$W^{\circ\circ}(\theta, \varphi; \varepsilon) = \frac{W_0^{\circ\circ}}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=2,4,6} \beta_k^{\circ\circ} P_k(\cos \theta) + \sum_{3,5} |\beta_{k3}^{\circ\circ}| P_k^3(\cos \theta) \cos(3\varphi - \arg[\beta_{k3}^{\circ\circ}]) \right) .$$



Значительное повышение симметрии и тот же когерентный контроль

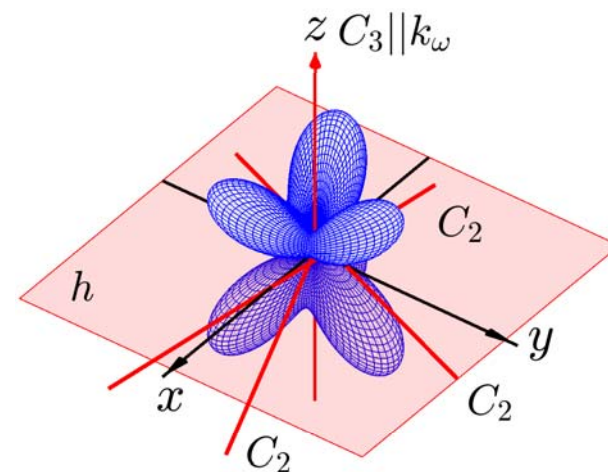
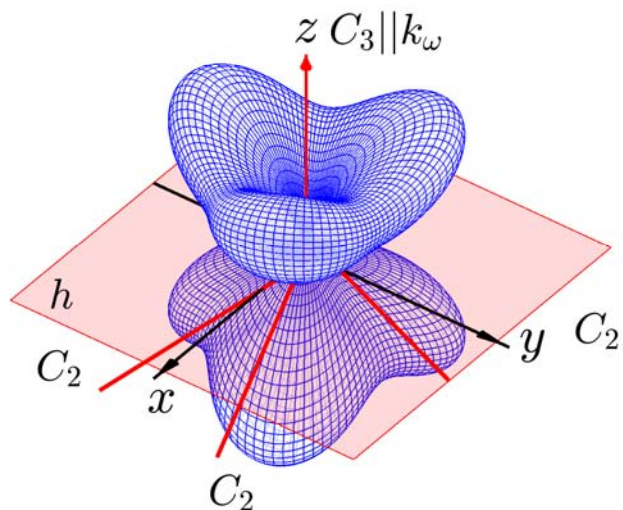
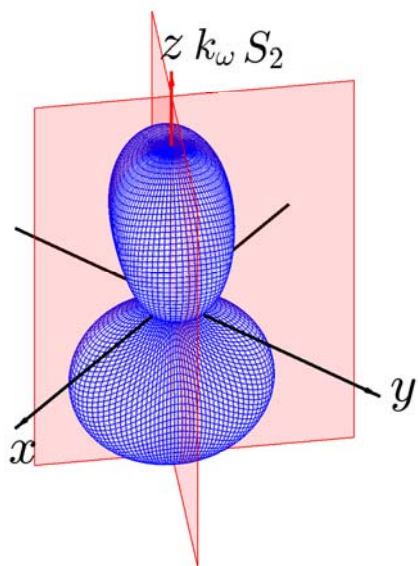
Линейная поляризация XUV, круговая ω

$\omega+2\omega$

RABBITT

$$\frac{dW^{CL}}{d\Omega} = \frac{W_0}{4\pi} \left[1 + \beta_2^{CL} P_2(\cos \vartheta) + \beta_4^{CL} P_4(\cos \vartheta) + \beta_3^{CL} \cos \vartheta \sin^2 \vartheta \cos(2\varphi - \psi_3^{(CL)}) \right].$$

$$W^{\circ\circ}(\theta, \varphi; \varepsilon) = \frac{W_0^{\circ\circ}}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=2,4,6} \beta_k^{\circ\circ} P_k(\cos \theta) + \sum_{3,5} |\beta_{k3}^{\circ\circ}| P_k^3(\cos \theta) \cos(3\varphi - \arg[\beta_{k3}^{\circ\circ}]) \right).$$



Изменение группы симметрии и тот же когерентный контроль

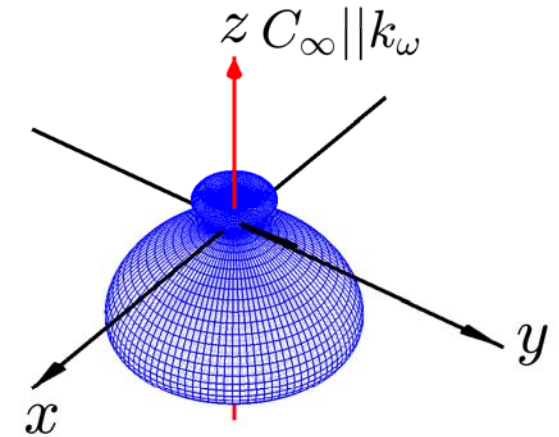
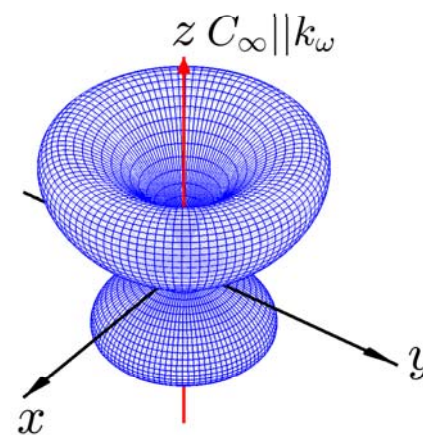
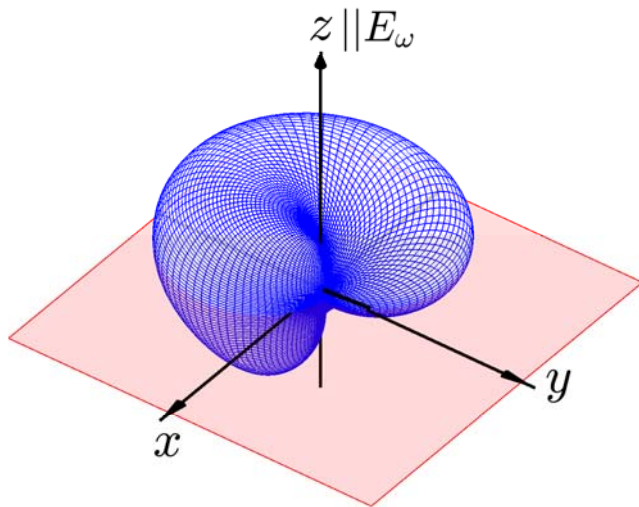
Круговая поляризация XUV и линейная ω

$\omega+2\omega$

RABBITT

$$\frac{dW^{LC}}{d\Omega} = \frac{W_0}{4\pi} \left[1 + \beta_2^{LC} P_2(\cos \vartheta) + \beta_4^{LC} P_4(\cos \vartheta) + \beta_1^{LC} \sin \vartheta \cos(\varphi - \psi_1^{LC}) - \beta_3^{LC} \sin^3 \vartheta \cos(\varphi - \psi_3^{LC}) \right].$$

$$W^{\circ\uparrow}(\theta; \varepsilon) = \frac{W_0^{\circ\uparrow}}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=1, \dots, 6} \beta_k^{\circ\uparrow} P_k(\cos \theta) \right)$$



Восстановление аксиальной симметрии и снятие вырождения когерентного контроля

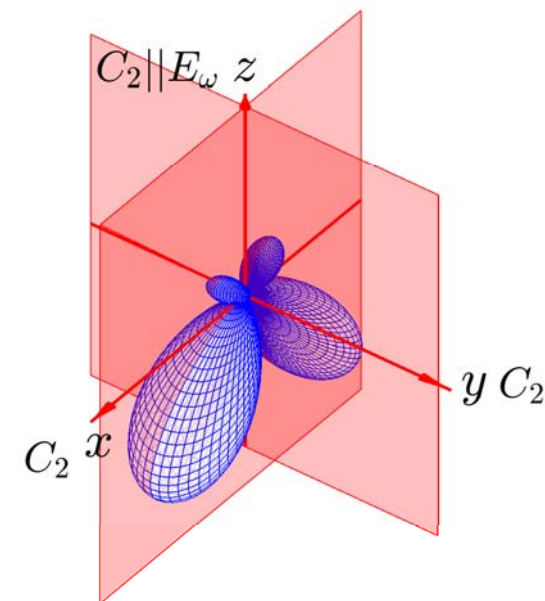
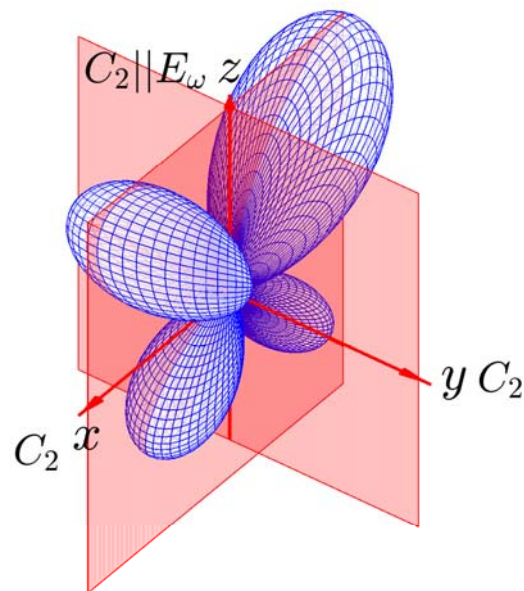
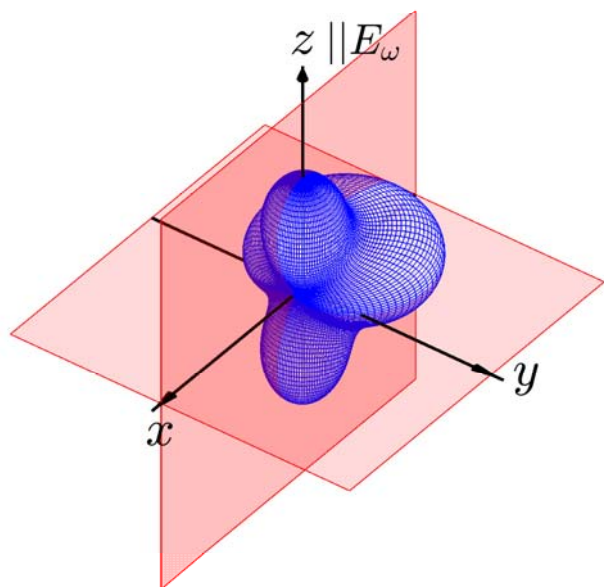
Скращенные линейные поляризации

$\omega+2\omega$

RABBITT

$$W^\perp(\vartheta, \varphi) = 1 + \sum_{k=2,4} \beta_k^\perp P_k(\cos \vartheta) + \beta^\perp \sin^2 \vartheta \cos 2\varphi + \sum_{k=1,3} \beta_k^\perp \sin^k \vartheta \cos \varphi.$$

$$W^{\rightarrow\uparrow}(\theta, \varphi; \varepsilon) = \frac{W_0^{\rightarrow\uparrow}}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=1, \dots, 6} \beta_k^{\rightarrow\uparrow} P_k(\cos \theta) + \cos(2\varphi) \sum_{k=2, \dots, 6} \beta_{k2}^{\rightarrow\uparrow} P_k^2(\cos \theta) \right).$$

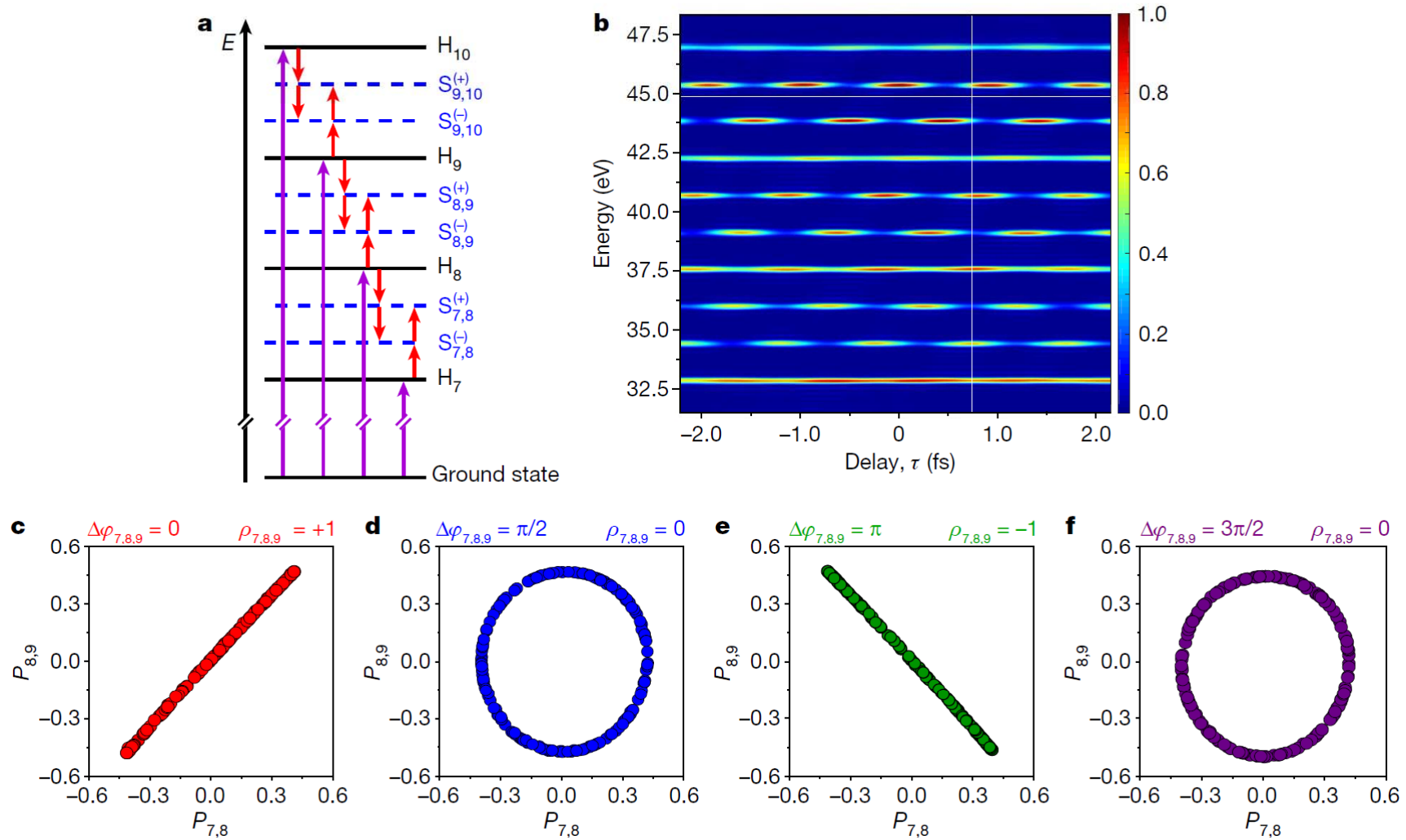


Одинаковая симметрия и вид (?) когерентного контроля

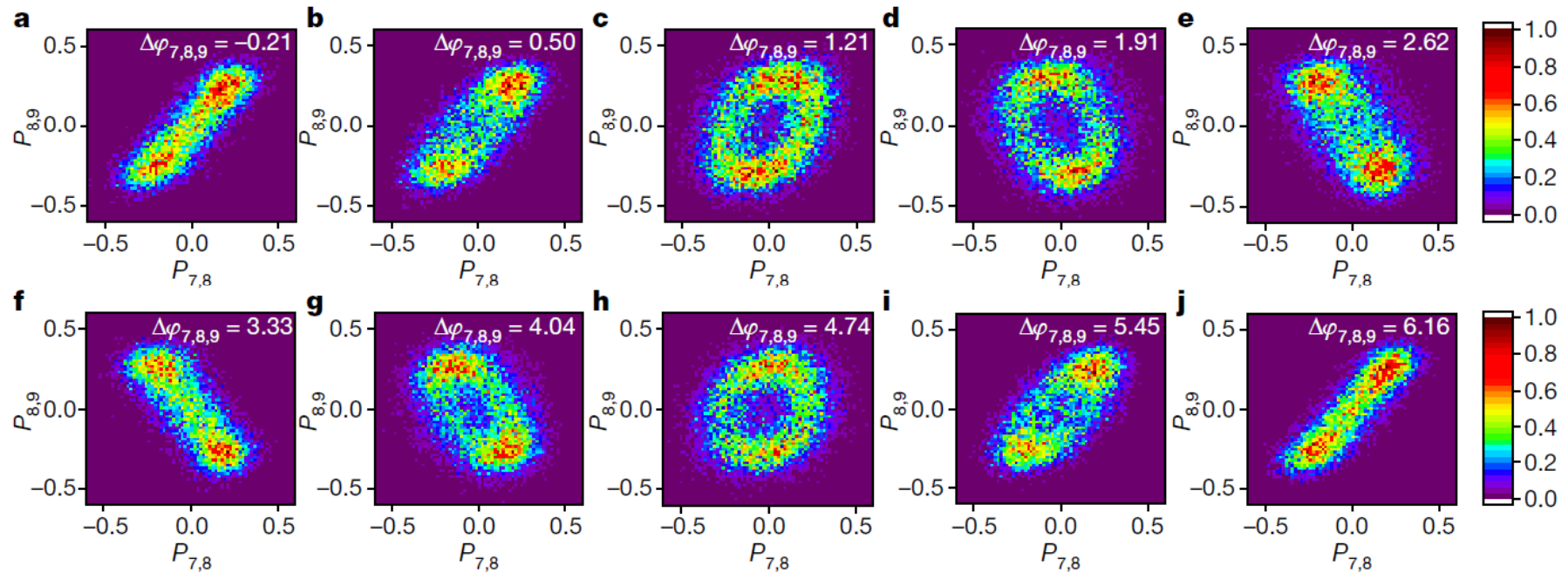
Группы симметрии

<u>Geometry</u>	$\uparrow\uparrow$	$\circlearrowleft\circlearrowleft$	$\circlearrowleft\circlearrowright$	$\uparrow\circlearrowleft$	$\circlearrowleft\uparrow$	$\rightarrow\uparrow$
ML^1	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$
ML_{24}^4/ML_{27}^4	C_{∞}	D_{3h}/C_{3h}	C_{3h}/D_{3h}	C_{∞}	D_{3h}	C_{2v}
SB^2	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$	$C_{\infty h}$
SB^3	C_{∞}	C_{3h}	C_{3h}	C_{∞}	D_{3h}	C_{2v}
$\omega 2\omega$	C_{∞}	D_{3h}	C_{2v}	C_s	S_2	C_{2v}

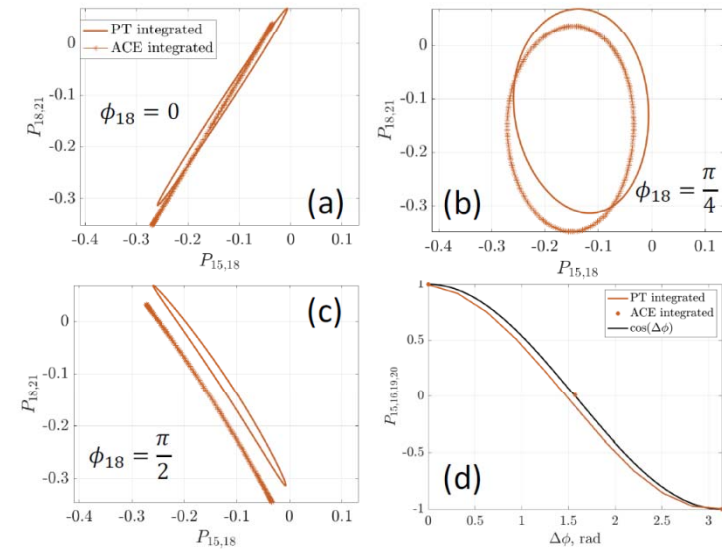
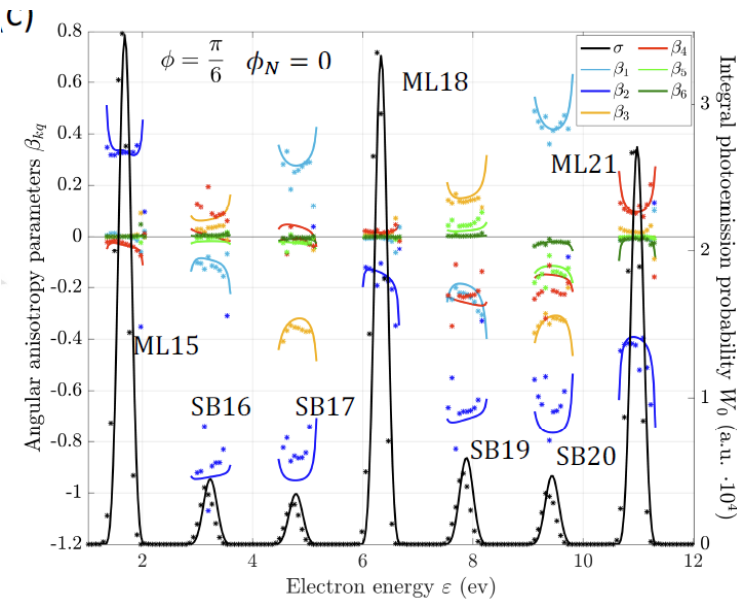
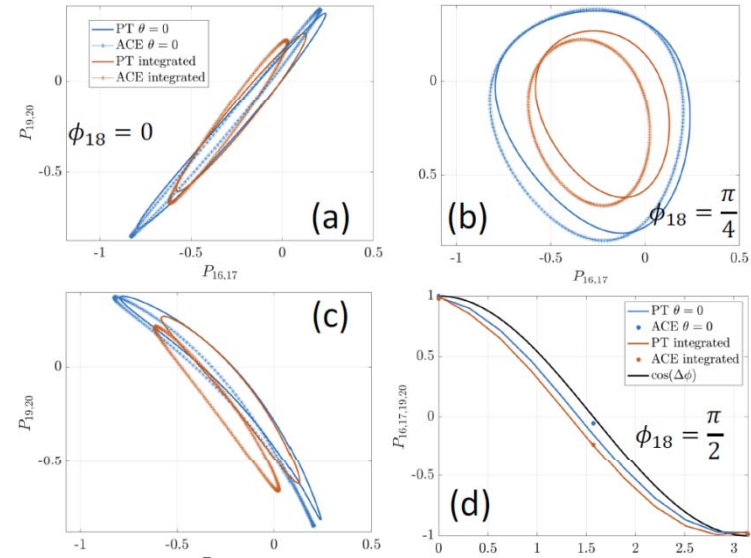
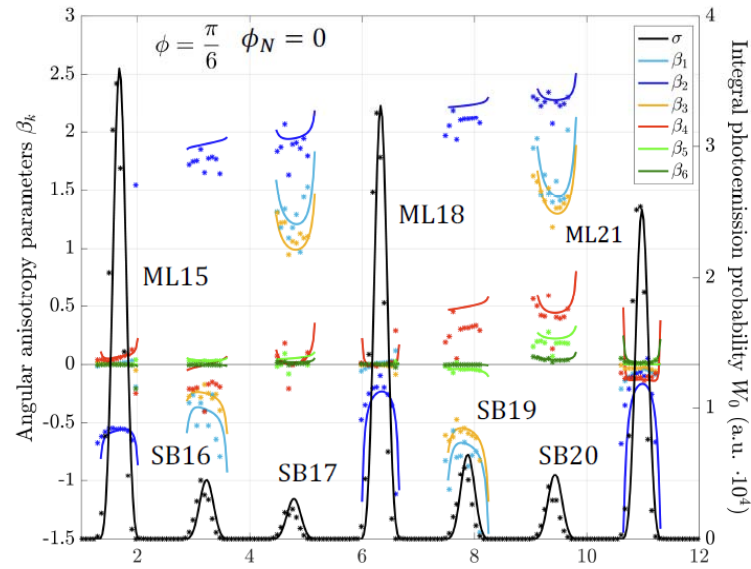
Определение фазы XUV гармоник ($\delta=3\omega$)



Определение фазы XUV гармоник ($\delta=3\omega$)



Определение фазы XUV гармоник ($\delta=3\omega$)



Заключение

- Методы генерации высокочастотного излучения с произвольно заданной поляризацией стремительно развиваются, и существует потребность в создании спектроскопически независимой базовой картины;
- Схемы аттосекундной метрологии со смешиванием четности, такие как бихроматическая ионизация или 2SB RABBITT, отличаются тем, что интерференция проявляется только в дифференциальных характеристиках (угловых распределениях). При этом интерференция — не просто периодическая, а обязательно гармоническая функция фазы между гармониками.

Заключение

- Несмотря на то, что математически интерференция волн различной четности всегда проявляется в возникновении полиномов нечетных рангов, две рассмотренные схемы имеют принципиальные различия для геометрий, где XUV компонента обладает круговой поляризацией. Для комбинации круговая + линейная в RABBITT наблюдается восстановление аксиальной симметрии и эффективный когерентный контроль, в то время как при бихроматической ионизации угловое распределение обладает крайне низкой симметрией, а контроль сводится к вращению.
- Перспективы применения: определение фазы и поляризации полей, возможности разделения энатомерных состояний, исследование дипольно-запрещенных резонансов.

Спасибо за внимание!