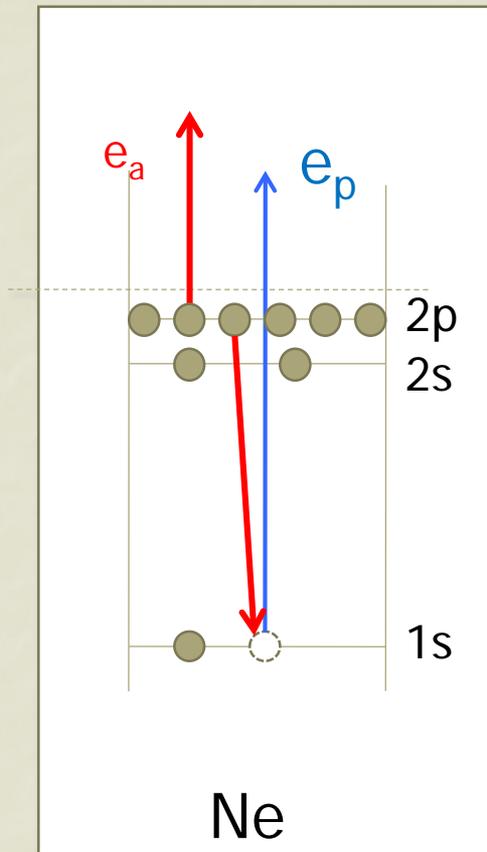


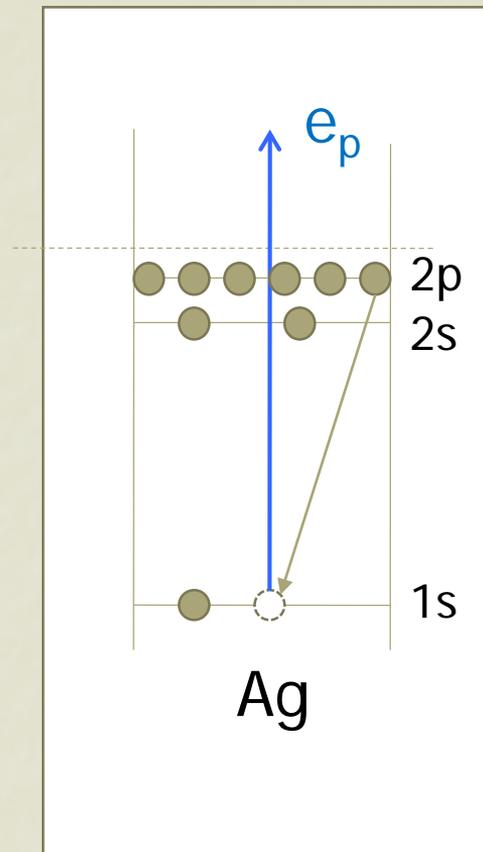
Физика внутренних электронных оболочек атомов

Н.М. Кабачник.

Рентгеновская и Оже-электронная спектроскопия



Безрадиационный (Оже) переход



Радиационный переход

Угловые распределения и поляризация характеристических рентгеновских лучей и Оже электронов

Считалось, что характеристическое рентгеновское излучение неполяризовано и излучается изотропно, Оже электроны так же излучаются изотропно

1968 *W. Mehlhorn*

1970 *J. Hrdy et al. PR A 2, 1708*

1974 *B. Clef and W. Mehlhorn*
J. Phys. B 7, 593

Volume 26A, number 4

PHYSICS LETTERS

15 January 1968

ON THE POLARIZATION OF CHARACTERISTIC X RADIATION

W. MEHLHORN

Institut für Kernphysik, Universität Münster, Germany

Received 27 November 1967

It is shown that characteristic X radiation following the ionization of an inner electron ($n, l > 0, j > \frac{1}{2}$) by electron or proton impact should generally be polarized.

Письма в ЖЭТФ, том 29, вып.7, стр. 385 – 387

5 апреля 1979 г.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
ВОЗБУЖДАЕМОГО ПРОТОННЫМ УДАРОМ

В.П.Петухов, Е.А.Романовский, С.В.Ермаков

С помощью дифракционного спектрометра-поляриметра впервые измерена степень поляризации рентгеновского излучения $L_{I^*}, L_{\alpha 1,2}$ и $L_{\beta 2,15}$ -линий атома серебра, возбуждаемого протонами. Установлено, что степень поляризации L_I -линии уменьшается от 29 до 8% при увеличении энергии протонов от 150 до 500 кэВ.

НИИЯФ:

Е.А. Романовский, В.П. Петухов

Начало работ в НИИЯФ



В.В. Балашов

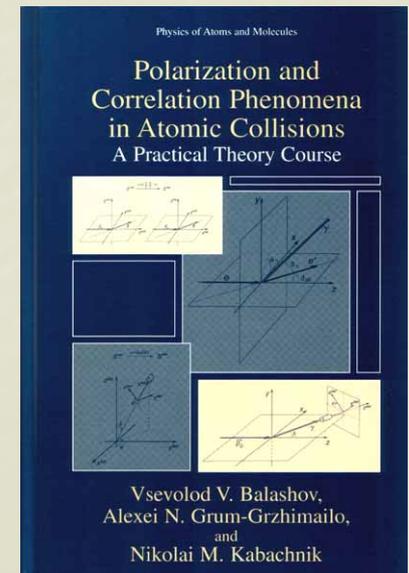
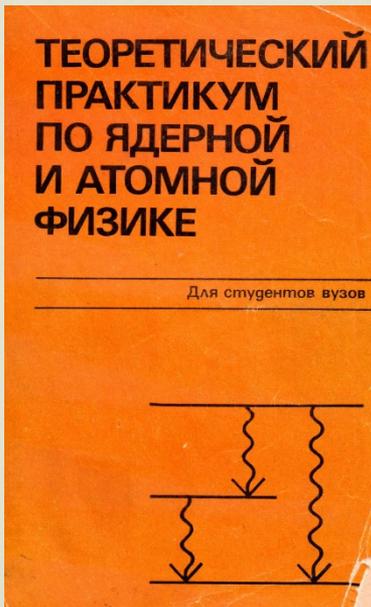
Теоретический практикум

60-е годы В.В. Балашов, Г.Я. Коренман, Ю.Ф. Смирнов, Н.П. Юдин

С.И. Страхова, Н.М. Кабачник, В.Л. Коротких, В.К. Долинов
А.Н. Грум-Гржимайло и другие

*1984 Теоретический практикум по
ядерной и атомной физике*

Составная часть теорпрактикума – теория угловых корреляций и поляризации продуктов реакций на основе матрицы плотности и тензорных операторов.



Теория корреляционных и поляризационных явлений при ионизации внутренних оболочек атомов



Е.Г.Бережко

J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., Vol. 10, No. 12, 1977. Printed in Great Britain. © 1977

Theoretical study of inner-shell alignment of atoms in electron impact ionisation: angular distribution and polarisation of x-rays and Auger electrons

E G Berezhko and N M Kabachnik

Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 117234, USSR

Received 10 January 1977

Угловое распределение электронов Оже:

$$I(\vartheta) = \frac{I_0}{4\pi} \left(1 + \sum_{k=2,4..} \alpha_k \mathcal{A}_{k0} P_k(\cos \vartheta) \right)$$

Угловое распределение и поляризация рентгеновских лучей

Совпадателные эксперименты

Photoelectron - Auger electron coincidence

1978 E.G. Berezhko, N.M.Kabachnik, V.V. Sizov *J.Phys.B* 11,1819

$$\gamma + A(J_i \pi_i) \rightarrow A^+(J_f \pi_f) + e_{ph}(l_1, j_1)$$

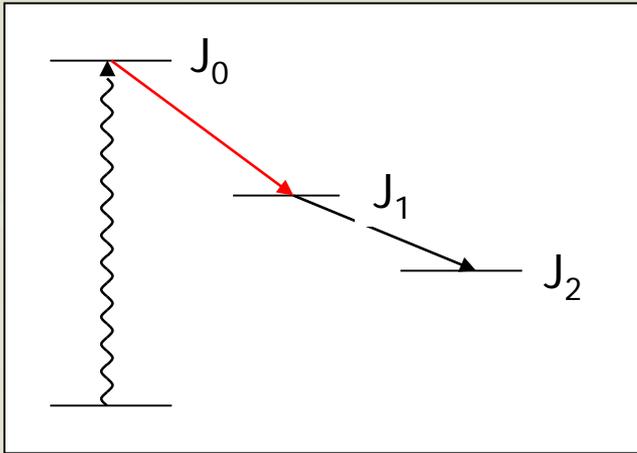
Angular correlations

$$\hookrightarrow A^{2+}(J \pi) + e_A(l_2, j_2)$$

$$I(\hat{n}_1, \hat{n}_2) = C \left(1 + \sum_k \alpha_k \sum_q \sqrt{\frac{4\pi}{2k+1}} A_{kq}(\hat{n}_1) Y_{kq}(\hat{n}_2) \right)$$

Эксперименты на синхротронах в Японии, Германии, Италии

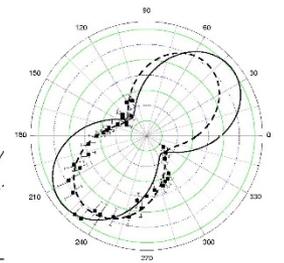
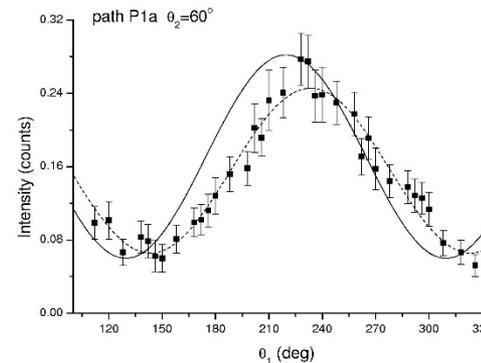
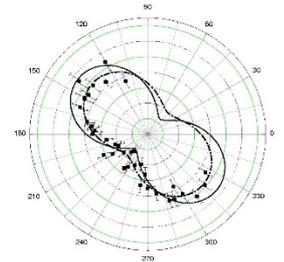
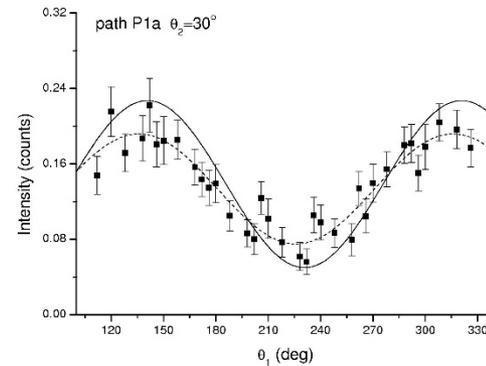
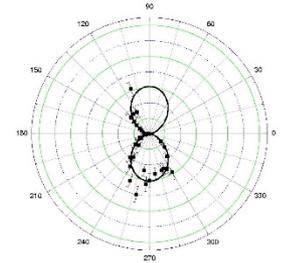
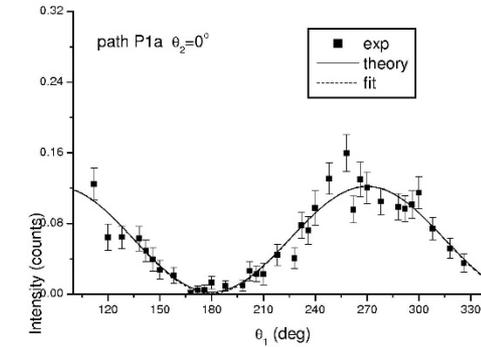
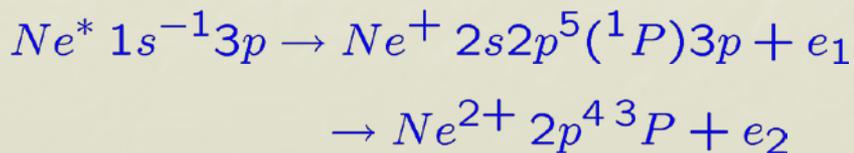
Каскад Оже переходов



$$A(J_0\pi_0) \rightarrow A^+(J_1\pi_1) + e_{A_1}(l_1, j_1) \quad \text{Угловые корреляции}$$

$$\hookrightarrow A^{2+}(J_2\pi_2) + e_{A_2}(l_2, j_2)$$

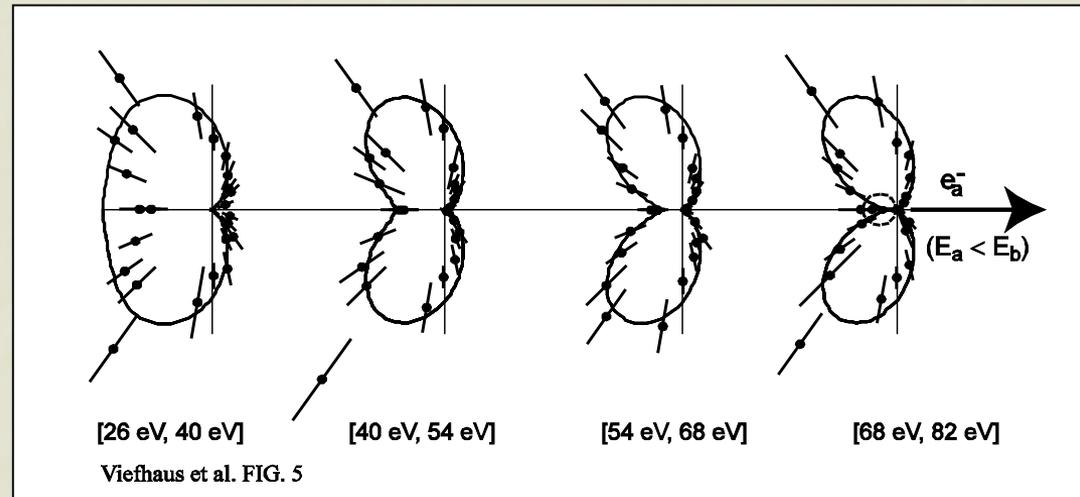
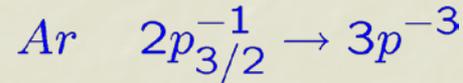
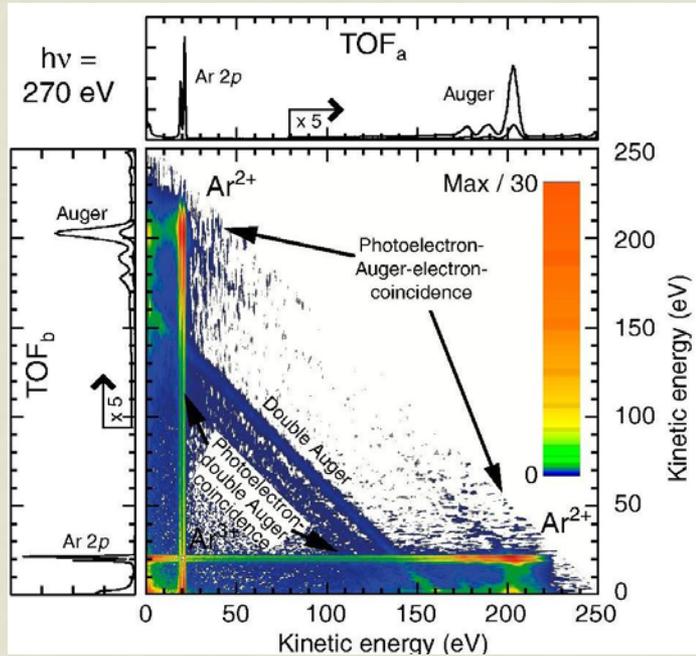
Example: *F. Da Pieve et al 2005*



Двойной Оже распад



Пример: *J. Viefhaus et al PRL 92 (2004) 083001*



Теория: *A.N. Grum-Grzhimailo and N.M. Kabachnik JP B 37 (2004) 1879*

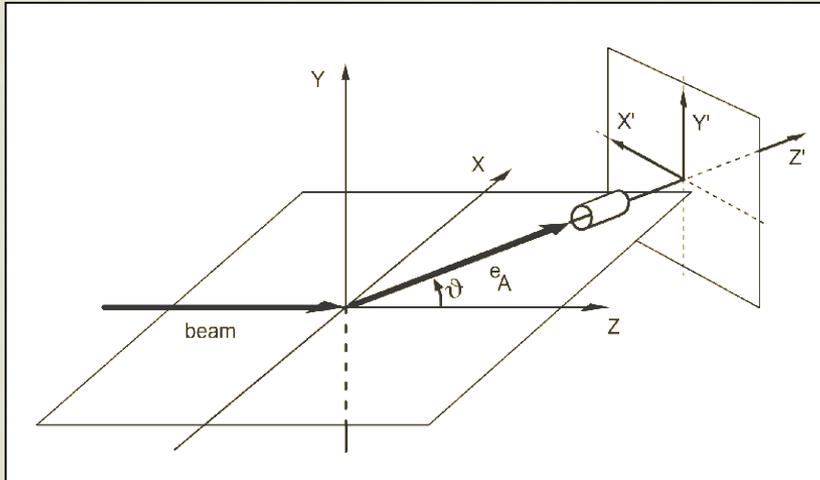
$$W_{1p0}(\theta) = |a_{g0}(\theta)|^2 (1 + \cos \theta) + |a_{u0}(\theta)|^2 (1 - \cos \theta)$$

$$W_{3p0}(\theta) = |a_{g1}(\theta)|^2 (1 - \cos \theta) + |a_{u1}(\theta)|^2 (1 + \cos \theta)$$

Спиновая поляризация электронов Оже

1980 H. Klar, *J.Phys.B* 13,4741; 1981 N. Kabachnik, *J.Phys.B*14, L377

1985 U. Hahn et al. *J.Phys.B* 18, 417



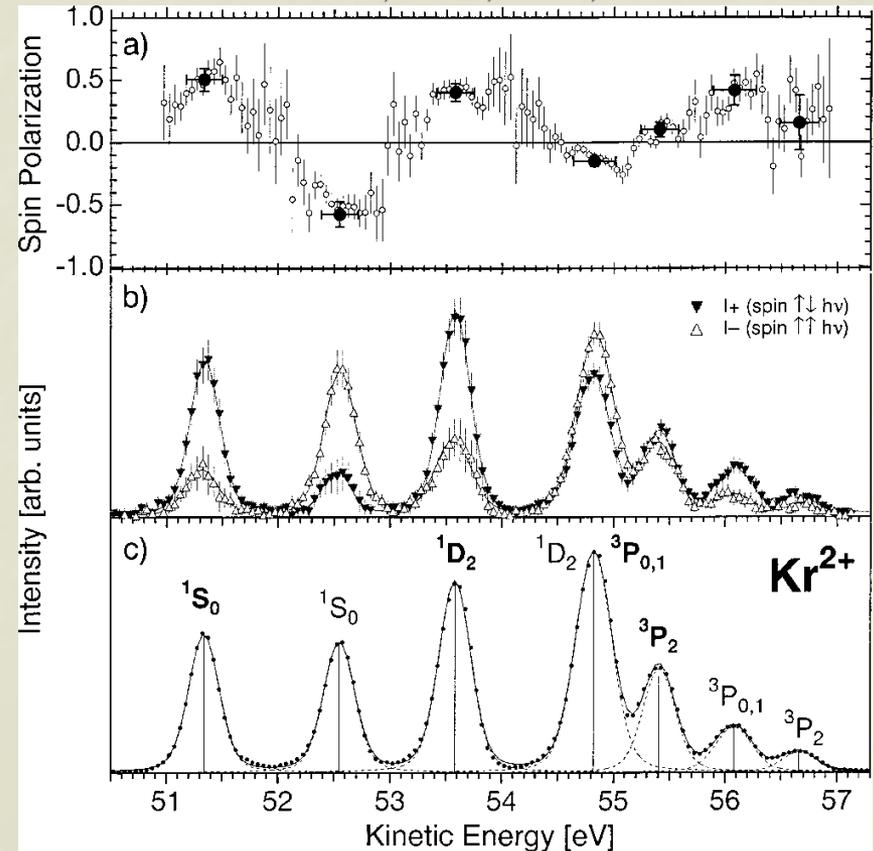
$$P_{x'} = \frac{\xi_1 A_{10} \sin \vartheta}{1 + \alpha_2 A_{20} P_2(\cos \vartheta)}$$

$$P_{y'} = \frac{\xi_2 A_{20} \sin 2\vartheta}{1 + \alpha_2 A_{20} P_2(\cos \vartheta)}$$

$$P_{z'} = \frac{\delta_1 A_{10} \cos \vartheta}{1 + \alpha_2 A_{20} P_2(\cos \vartheta)}$$

Example: *G. Snell et al PR A 66 (2002) 022701*

Kr M_{4,5}N_{2,3}N_{2,3}



Полный опыт для распада Оже

N. M. Kabachnik and I. P. Sazhina JP B 23 (1990) L353

Измеряемые величины
(intrinsic parameters) :

$\alpha_2,$	$\xi_2,$	$\xi_1,$	δ_1
$\alpha_4,$	$\xi_4,$	$\xi_3,$	δ_3

Параметры более высокого ранга могут быть получены, например, из совпадательных экспериментов фото- и Оже электронов

$$\tau = \sum_{l_j, l_{j'}} a(l_j, l_{j'}) M_{l_j} M_{l_{j'}}^*$$

Полное число измеряемых параметров: $4J_i + 1$

Полное число параметров Оже амплитуд: $4J_i + 1$

Следовательно: полный опыт возможен
ЕСЛИ
измеряемые параметры все независимы

Соотношения между измеряемыми параметрами

Частный случай $J_i = 3/2 \longrightarrow J_f = 1$ *B. Schmidtke et al. 2000, J.Phys.B 33*

$$\left[\alpha_2 - \sqrt{5}(\delta_1 + (-1)^l \xi_1) \right]^2 + (2\xi_2)^2 - (1 + \alpha_2) \left[5 - \sqrt{5}(\delta_1 - (-1)^l 2\xi_1) \right] = 0$$

Другие частные случаи рассмотрены в работах 2001-2004

A.N. Grum-Grzhimailo, I.P. Sazhina, N.M. Kabachnik

Общий случай $J_i \longrightarrow J_f$ *N.M. Kabachnik 2005, J.Phys.B 38, L19*

- В общем случае невозможно реализовать полный опыт, измеряя только параметры Оже электронов. Необходима информация о поляризационном состоянии остаточного иона.

Новая эра в рентгеновской и Оже спектроскопии

Рентгеновские лазеры на свободных электронах (XFEL) и генерация высоких гармоник (HHG) на оптических лазерах.

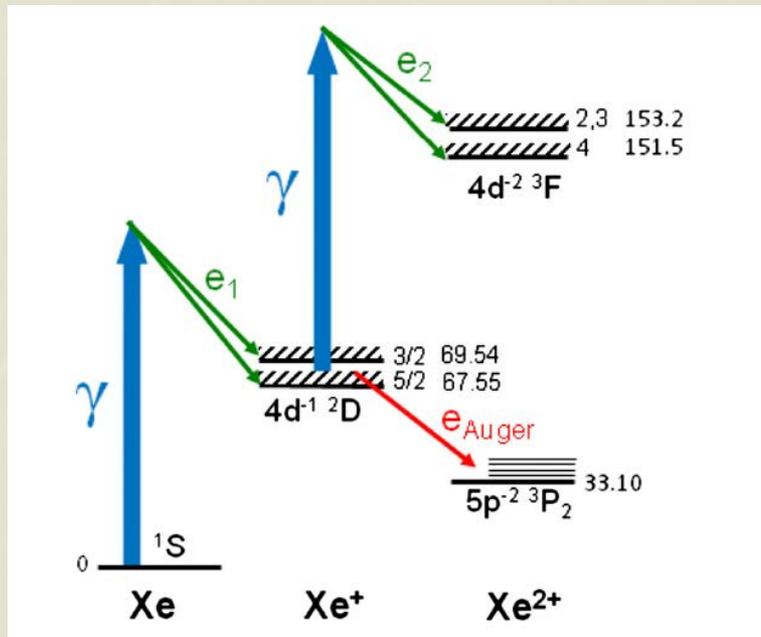
Главные преимущества XFEL

Интенсивность на порядки выше, чем синхротронные источники

Ультракороткие импульсы 1-100 fs

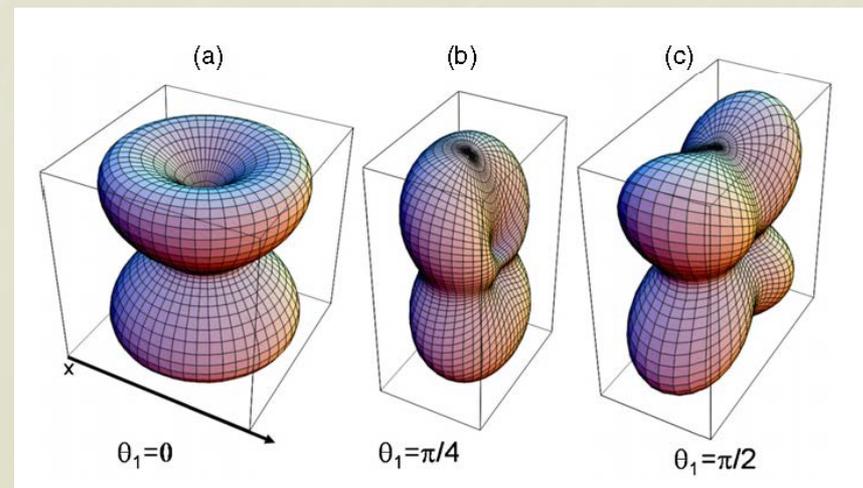
Последовательная двух-фотонная двойная ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ

Первые эксперименты на FLASH: *U. Becker 2008,*
M. Braune et al. J. Mod. Opt 63, 324, 2016



Серия работ 2009-2011

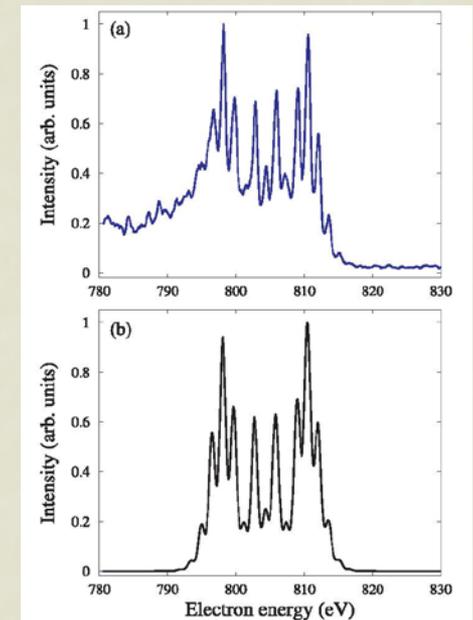
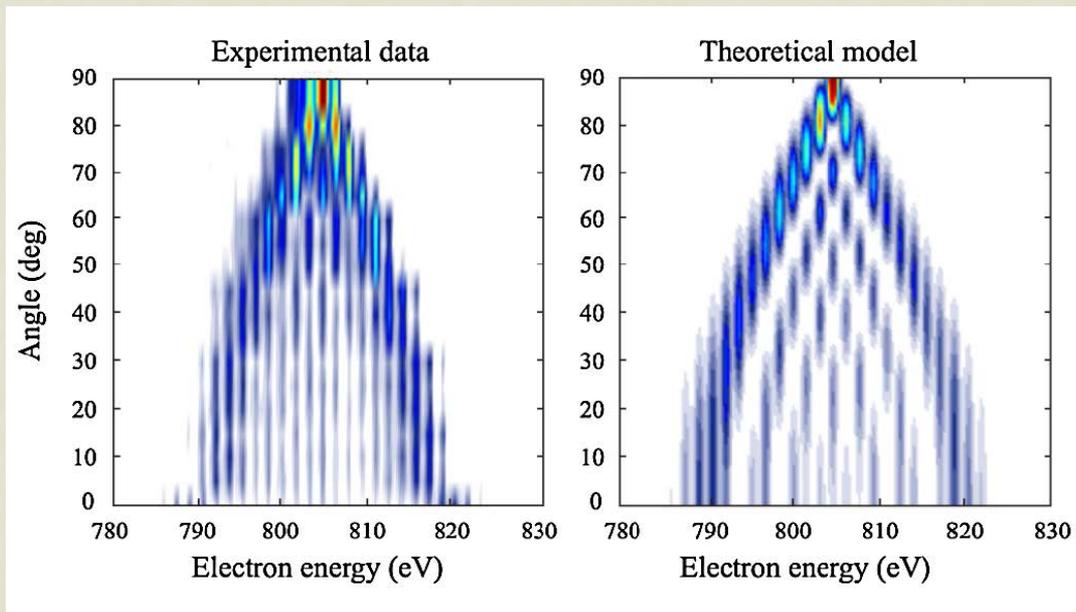
А.Н. Грум-Гржимайло, Е.В. Грызлова,
Н.М. Кабачник и Шт. Фритцше



Двухцветная (XUV+IR) ионизация и Оже распад атомов

Теория: *A.K. Kazansky, N.M. Kabachnik, J. Phys. B 43 (2010) 035601*
A.K. Kazansky, I.P. Sazhina, N.M. Kabachnik, J. Phys. B 44 (2011) 215601

Эксперимент на LCLS: K-LL in Ne *M.Meyer et al. PRL 108, 063007 (2012)*



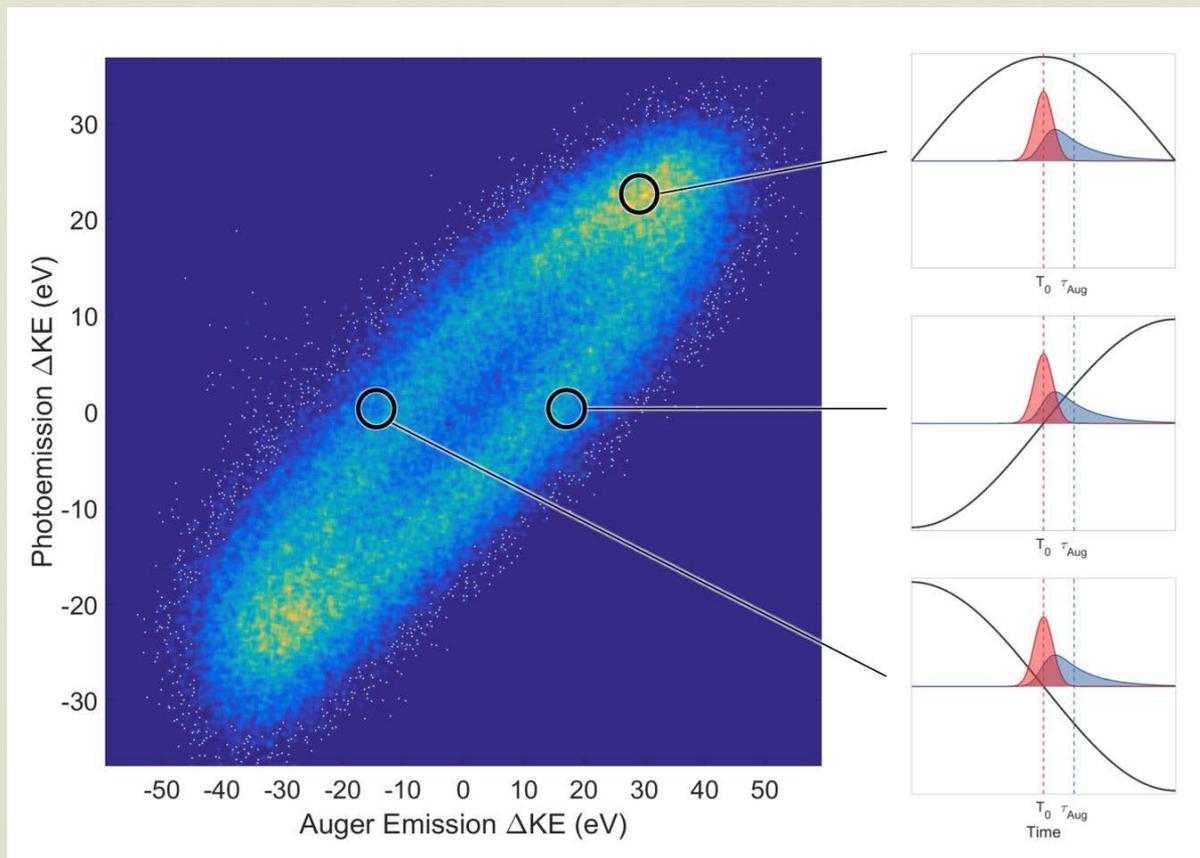
Хронометрирование распада Оже на XFEL

D.C.Haynes et al. Nature Physics 2021

Self-referenced attosecond streaking

Эксперимент на LCLS Ne KLL Оже распад в поле ИК лазера 800 нм

Время Оже распада 2.2 фс



Заключение

- Теоретические исследования выполненные в НИИЯФ послужили основой для анализа многих корреляционных и поляризационных экспериментов в рентгеновской и Оже спектроскопии.
- Новые перспективы в этой области связаны с рентгеновскими лазерами на свободных электронах и
- с лазерными источниками, основанными на генерации высоких гармоник.

Спасибо за внимание !