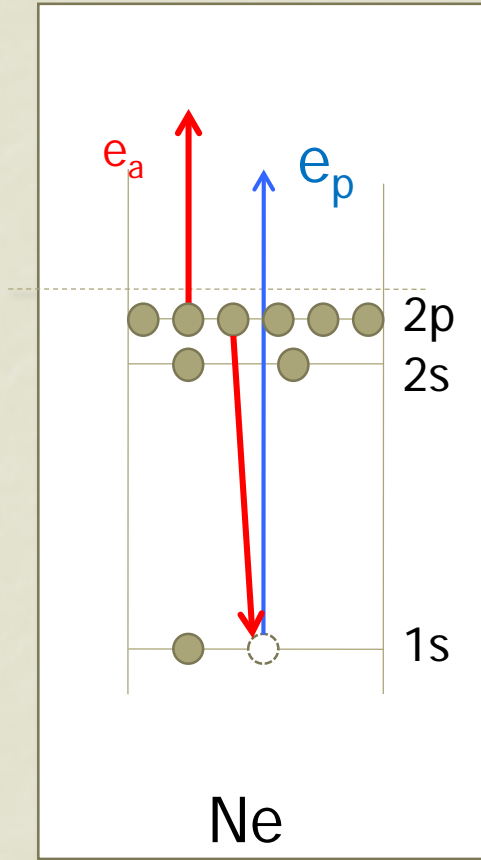


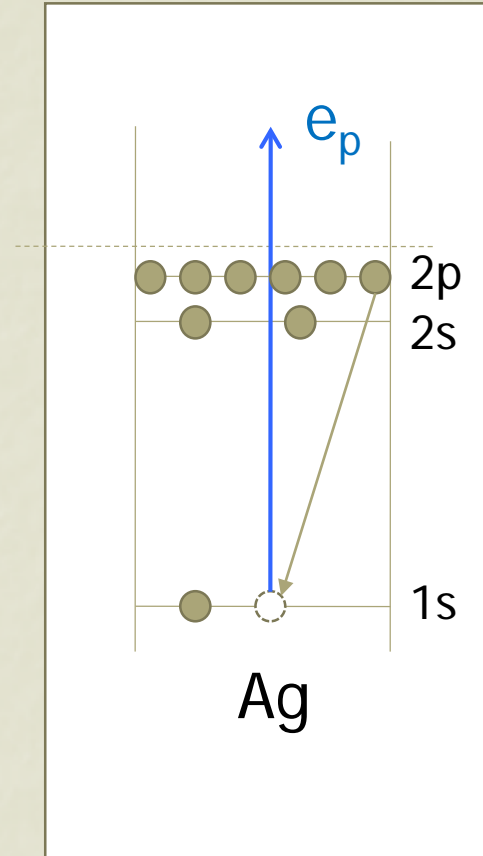
# **Физика внутренних электронных оболочек атомов**

*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

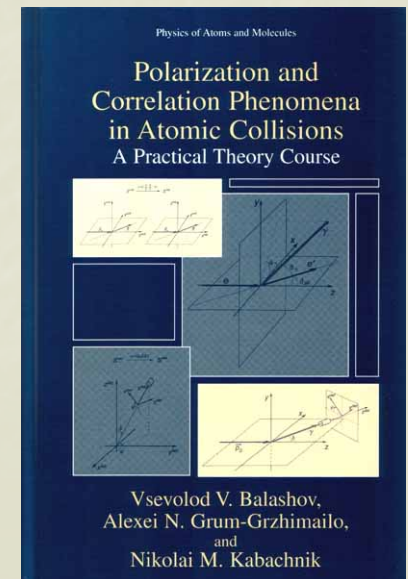
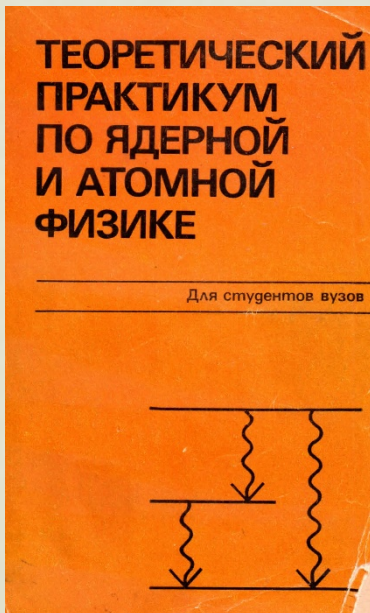
## Теоретический практикум

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:

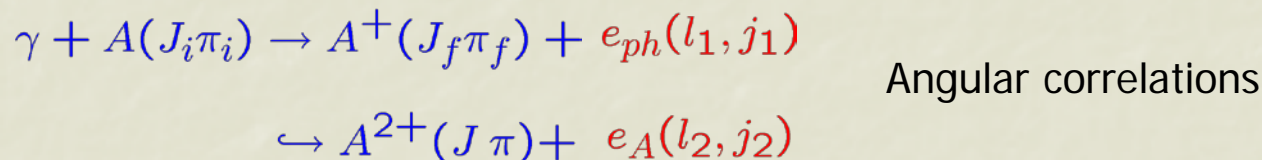
$$I(\vartheta) = \frac{I_0}{4\pi} \left( 1 + \sum_{k=2,4..} \alpha_k \mathcal{A}_{k0} P_k(\cos \vartheta) \right)$$

Угловое распределение и поляризация рентгеновских лучей

# Совпадателные эксперименты

## Photoelectron - Auger electron coincidence

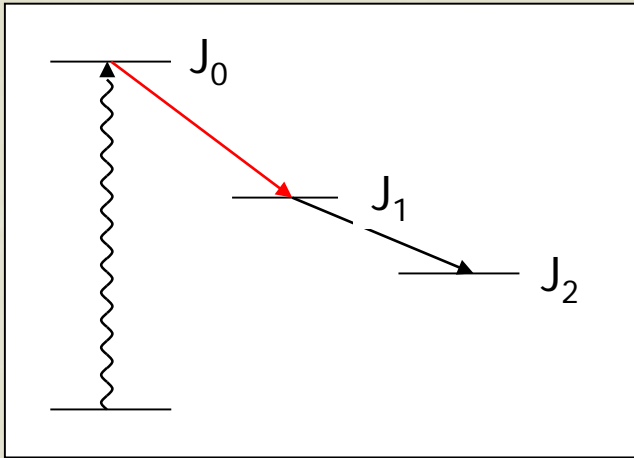
1978 E.G. Berezhko, N.M.Kabachnik, V.V. Sizov *J.Phys.B* 11,1819



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

Эксперименты на синхротронах в Японии, Германии, Италии

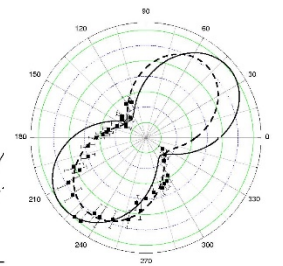
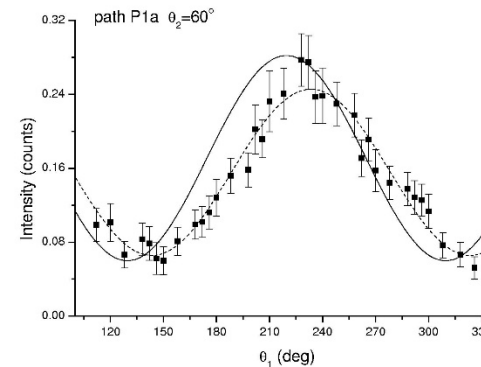
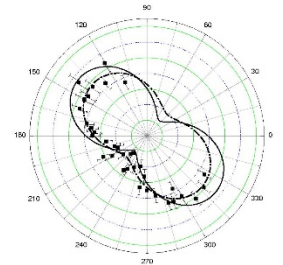
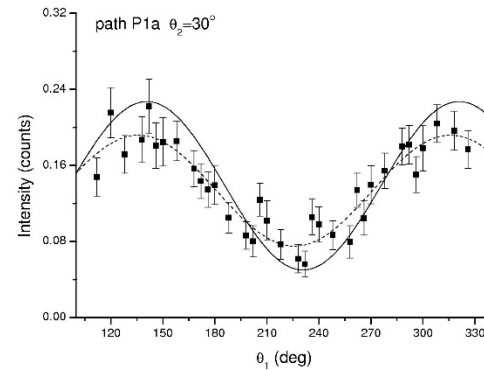
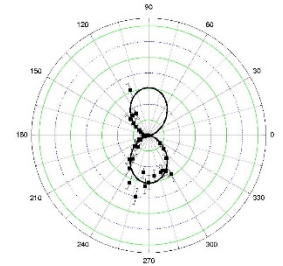
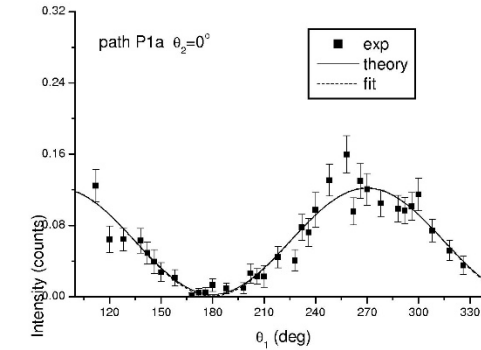
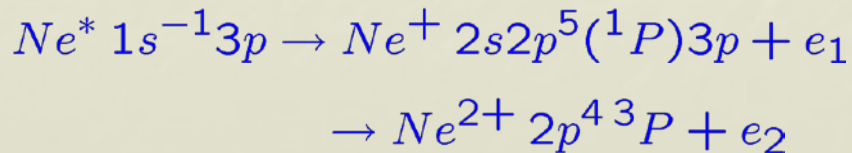
# Каскад Оже переходов



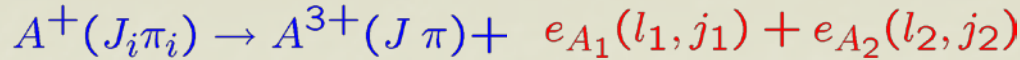
$$A(J_0\pi_0) \rightarrow A^+(J_1\pi_1) + e_{A_1}(l_1, j_1) \quad \text{Угловые корреляции}$$

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

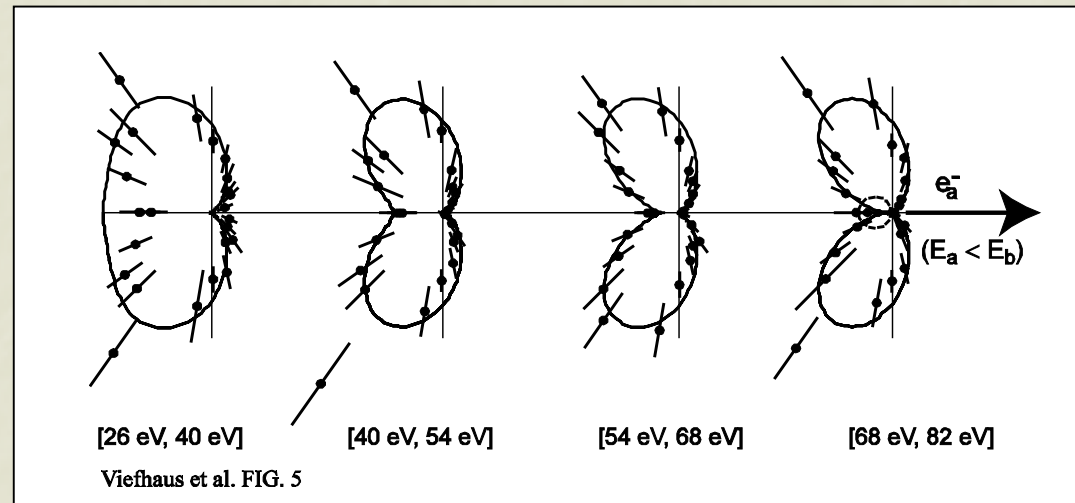
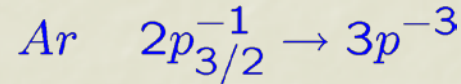
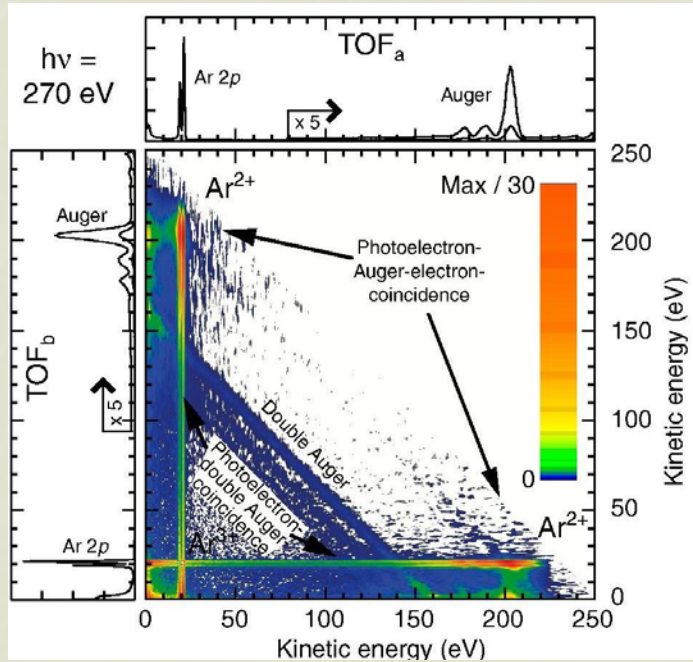
Example: *F. Da Pieve et al 2005*



# 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*

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

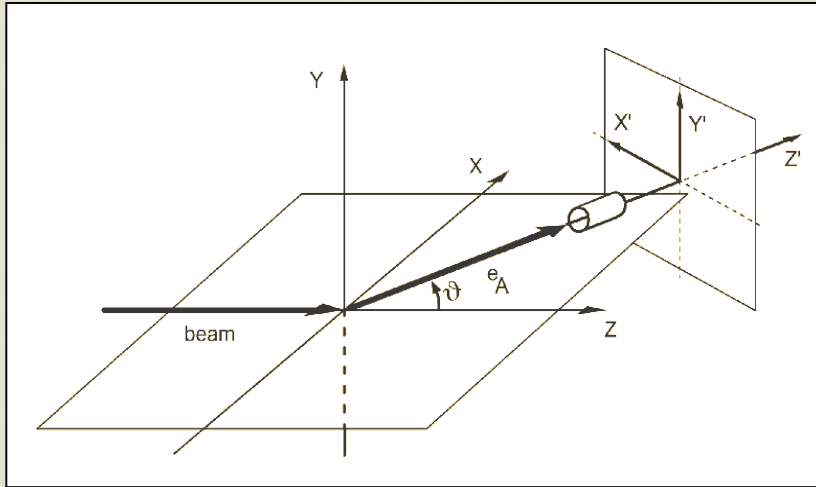
$$W_{3p0}(\theta) = |a_{g1}(\theta)|^2 (1 - \cos \theta) + |a_{u1}(\theta)|^2 (1 + \cos \theta)$$



# 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



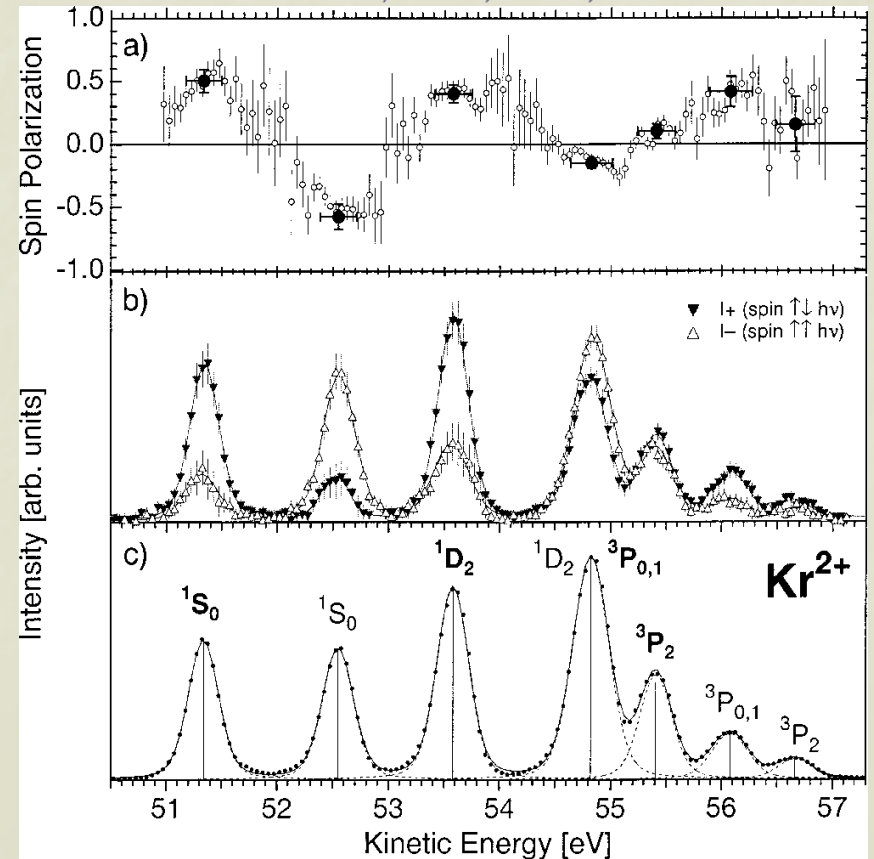
$$P_{x'} = \frac{\xi_1 A_{10} \sin \vartheta}{1 + \alpha_2 A_{20} P_2(\cos \vartheta)}$$

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

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

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

*Kr M<sub>4,5</sub>N<sub>2,3</sub>N<sub>2,3</sub>*



# Полный опыт для распада Оже

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

Измеряемые величины  
(intrinsic parameters) :

$\alpha_2, \xi_2, \xi_1, \delta_1$

$\alpha_4, \xi_4, \xi_3, \delta_3$

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

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

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.

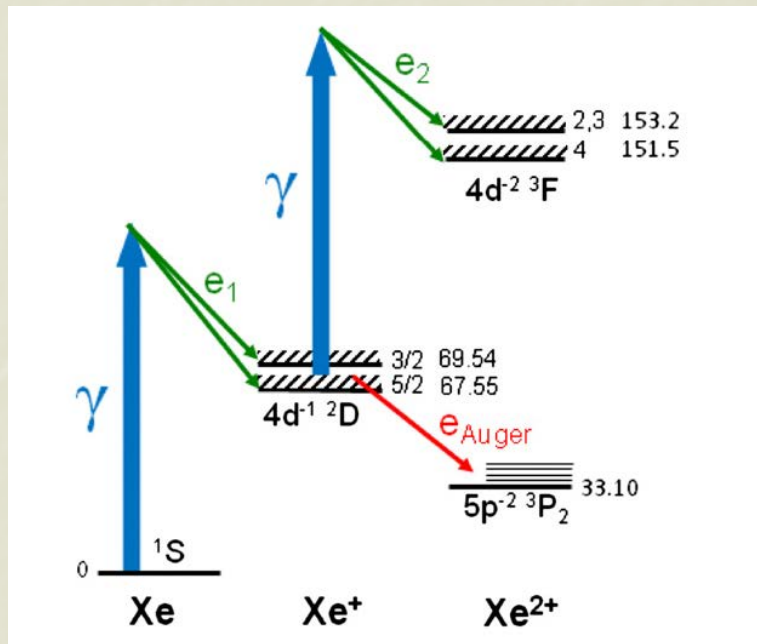
Главные преимущества XFEL

Интенсивность на порядки выше, чем синхротронные источники

Ультракороткие импульсы 1-100 fs

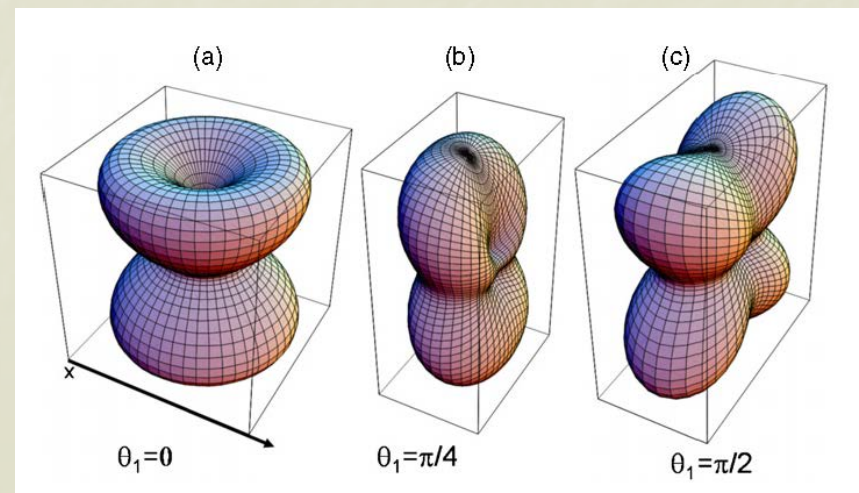
# Последовательная двух-фотонная двойная ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ

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



Серия работ 2009-2011

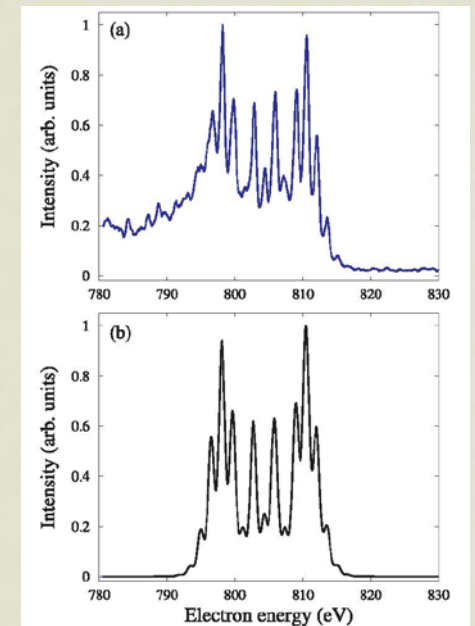
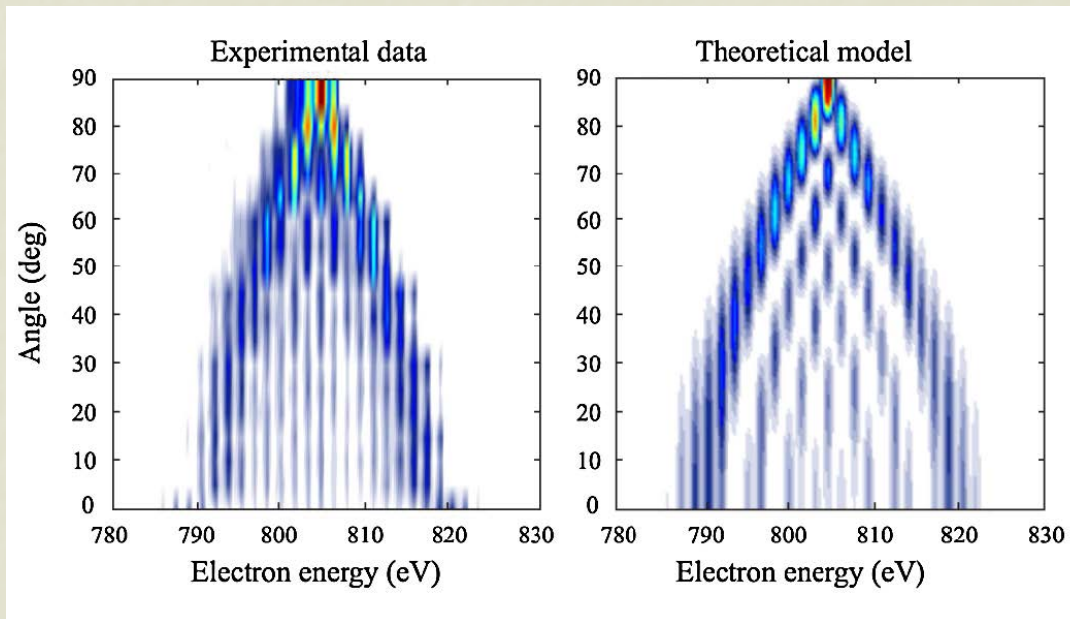
А.Н. Грум-Гржимайло, Е.В. Грызлова,  
Н.М. Кабачник и Шт. Фритцше



# 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)*



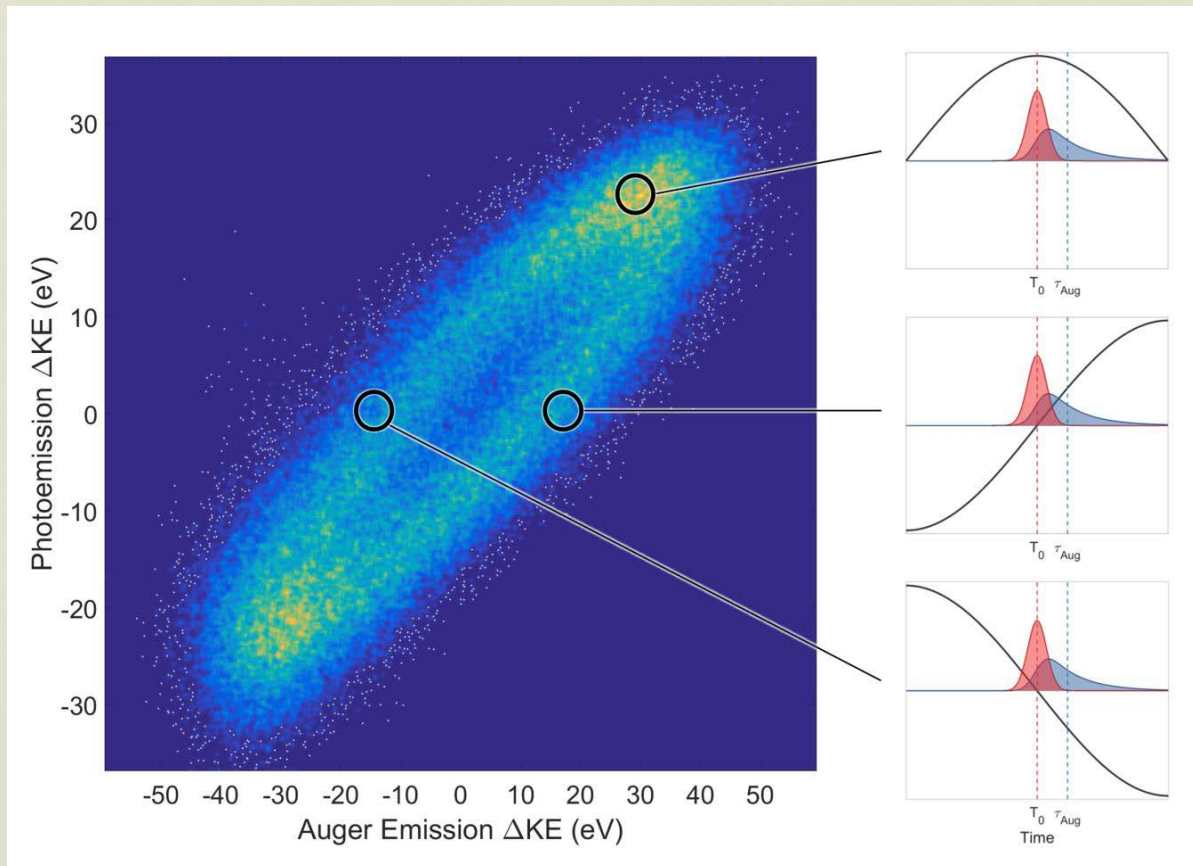
# Хронометрирование распада Оже на XFEL

*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 !**