

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ДВОЙНОЙ ДВУХФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Е.В. Грызлова,

А.Н. Грум-Гржимайло, Н.М. Кабачник, С.И. Страхова

НИИЯФ МГУ (Россия)

С. Фритцше

GSI (Германия)

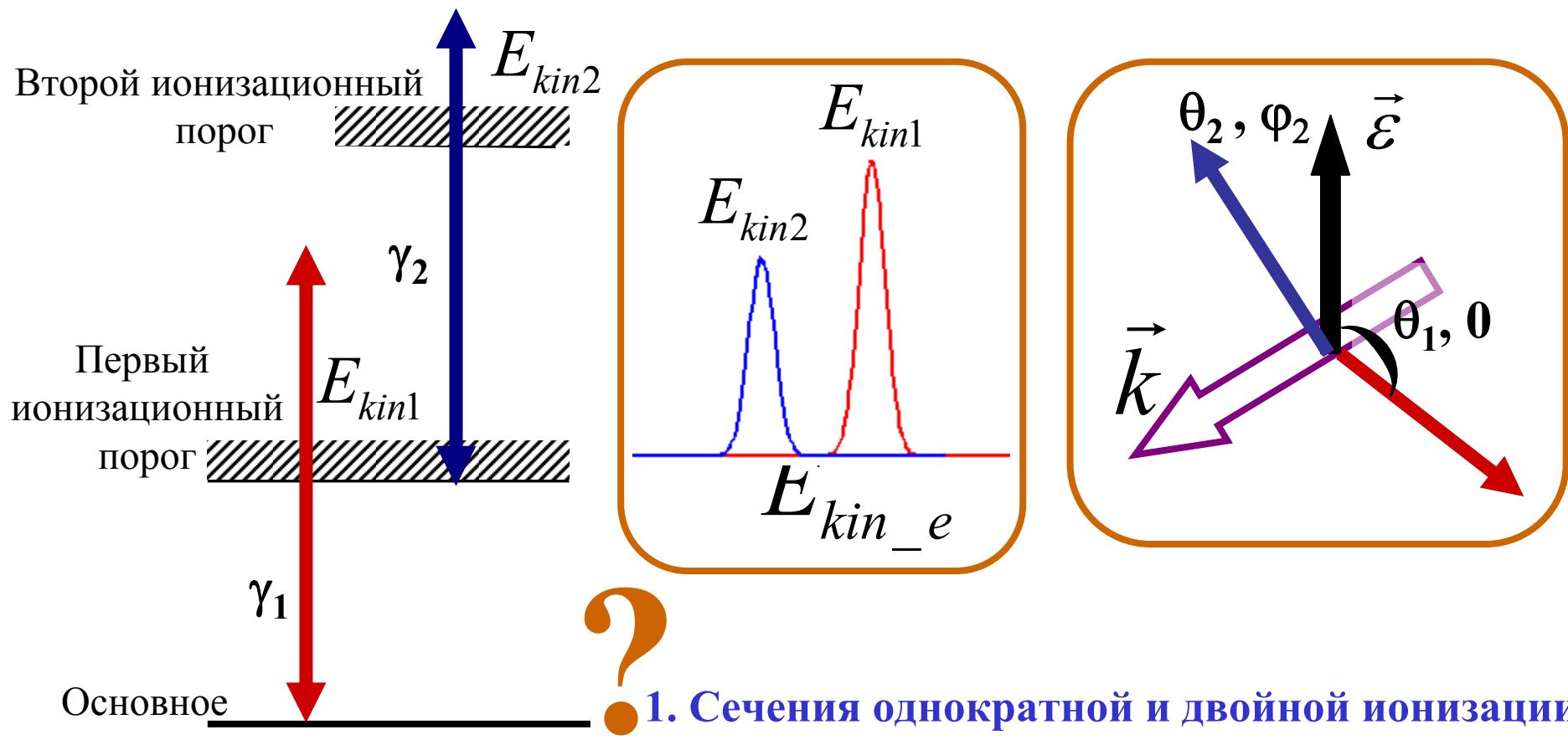
Концентрированные потоки частиц - 2009

Москва, Россия, 3 ноября 2009 г.

Сравнительные характеристики источников излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета

	Synchrotron	FEL	
$h\nu$	IR-X-Ray (1 eV-keV)	VUV-XUV 15-200 eV	
$\Delta E/E$	10^{-5}	10^{-3}	
ph/s	10^{14}	10^{15}	
ph/pulse	10^7	10^{14}	Достижение параметров сделало возможным наблюдение
Tunability	Easy	Possible	двойной двухфотонной ионизации атомов
repetition rate	pulsed MHZ	pulsed 10 Hz	
temporal width	30-50 ps	15 – 200 fs	

Двойная двухфотонная ионизация атомов

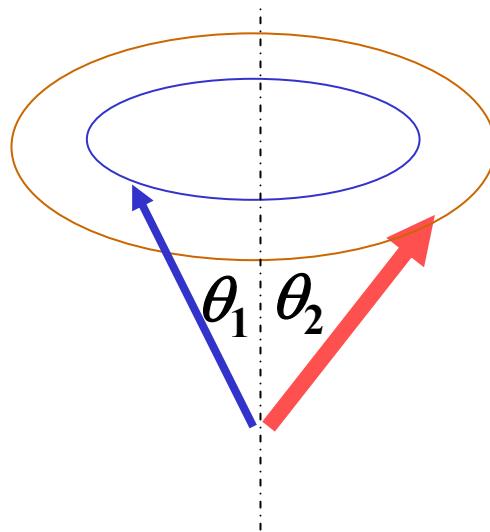


1. Сечения однократной и двойной ионизации
2. Спектры фотоэлектронов
3. Угловые распределения фотоэлектронов
4. Угловые корреляции

Метод расчета и основные приближения

1. Рассматривается последовательная (двухступенчатая) ионизация
2. Взаимодействие поля с атомом описывается в дипольном приближении
3. Для описания состояния атома в электромагнитном поле используется формализм статистических тензоров
4. Для расчета волновых функций использовался метод Хартри-Фока в многоконфигурационном приближении

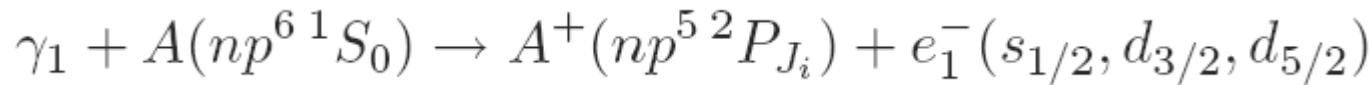
Угловые распределения фотоэлектронов в отсутствие связи между ступенями



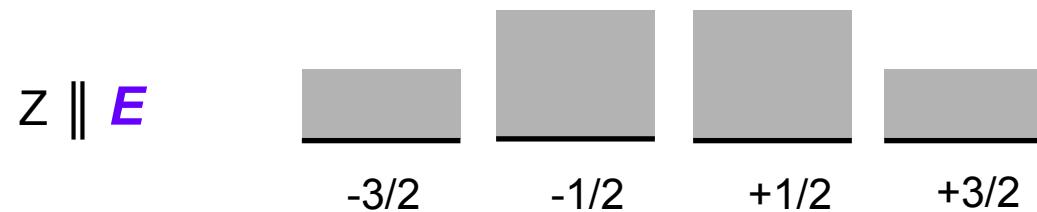
$$\begin{aligned} W(\vartheta_1, \varphi_1; \vartheta_2, \varphi_2) &= \frac{d\sigma_1}{d\Omega_1}(J_i) \cdot \frac{d\sigma_2}{d\Omega_2}(J_f) \\ &= \frac{\sigma_1(J_i)}{4\pi} \left(1 + \beta^{(1)} P_2(\cos \vartheta_1)\right) \frac{\sigma_2(J_f)}{4\pi} \left(1 + \beta^{(2)} P_2(\cos \vartheta_2)\right) \end{aligned}$$

В отсутствие связи между двумя ступенями ионизации угловые распределения фотоэлектронов обеих ступеней обладают аксиальной симметрией

Результаты расчетов выстроенности однократно заряженных ионов при ионизации Ne, Ar, Kr



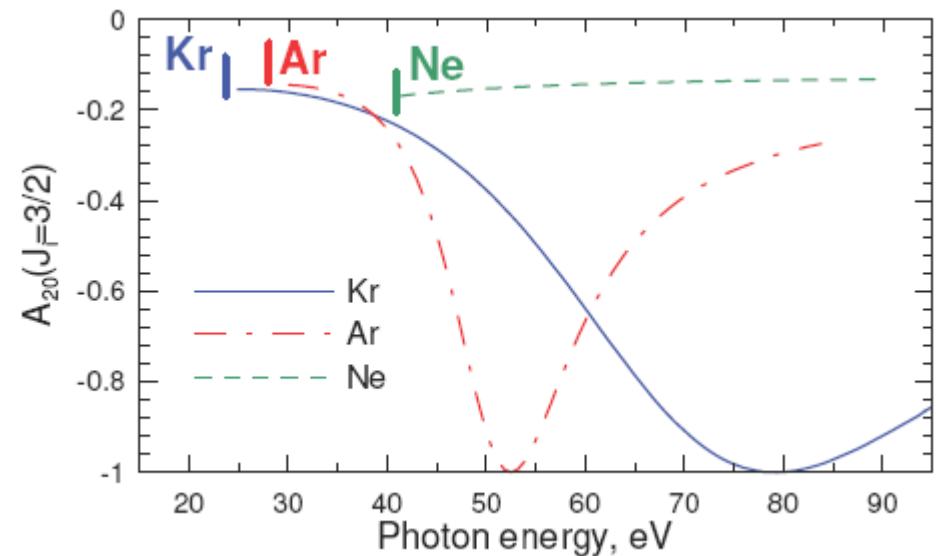
Выстроенность при $J_f=3/2$



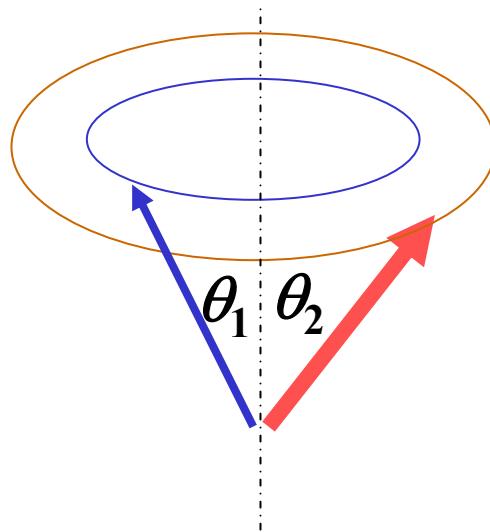
$$\mathcal{A}_{20}(^2P_{3/2}) = \frac{N_{3/2} - N_{1/2}}{N_{3/2} + N_{1/2}}$$

$$-1 \leq \mathcal{A}_{20}(^2P_{3/2}) \leq +1$$

$$\mathcal{A}_{20}(^2P_{1/2}) = 0$$



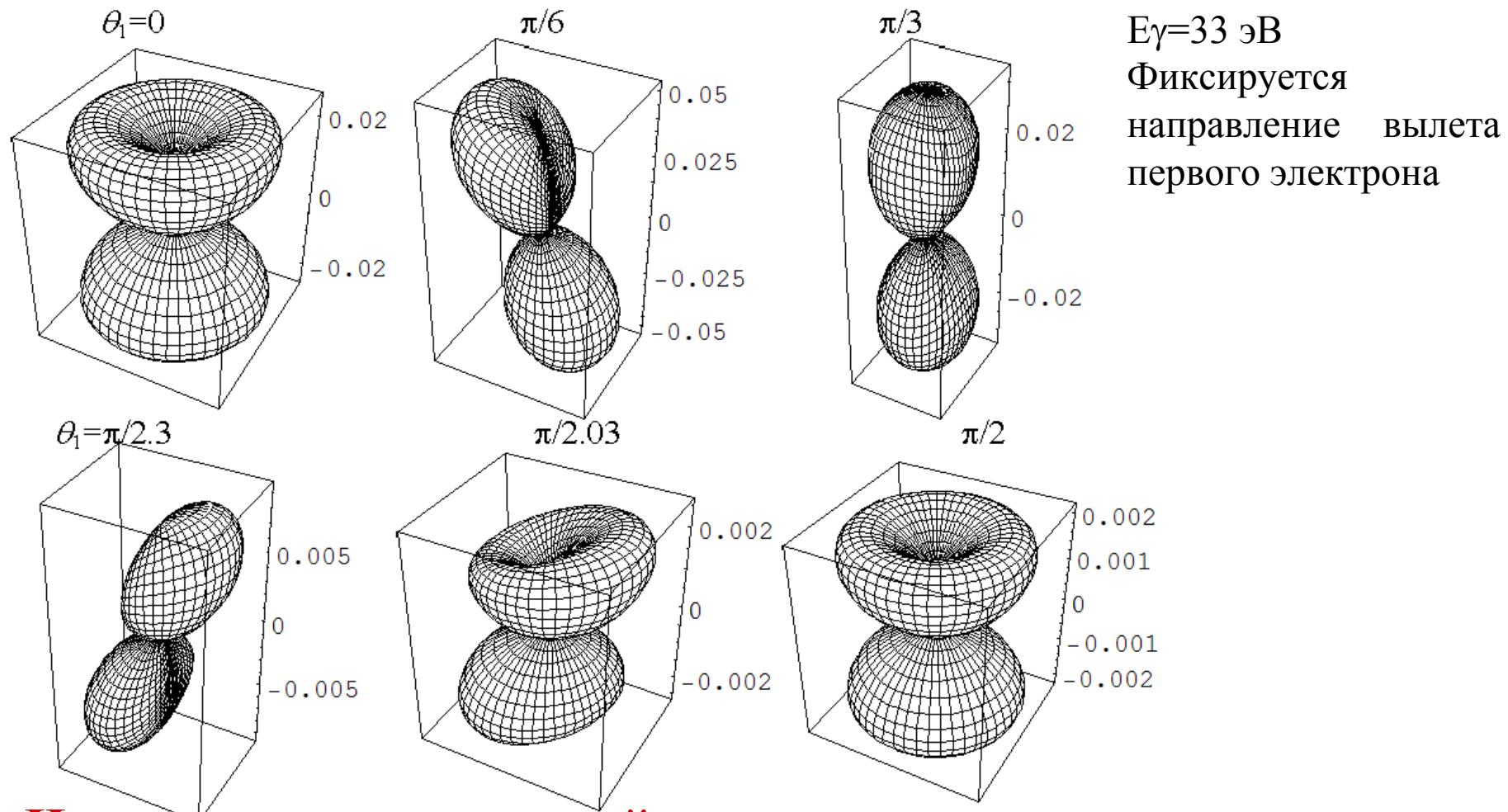
Угловые распределения фотоэлектронов при наличии связи между ступенями



$$\begin{aligned} W(\vartheta_2) &= \sigma_1(J_i) \frac{\sigma_2(J_f)}{4\pi} \left(1 + \beta^{(2)} P_2(\cos \vartheta_2) + \mathcal{A}_{20}(J_i) [a_0 + a_2 P_2(\cos \vartheta_2) + a_4 P_4(\cos \vartheta_2)] \right) \\ &= \frac{W_0}{4\pi} \left[1 + \beta_2^{(2)} P_2(\cos \vartheta_2) + \beta_4^{(2)} P_4(\cos \vartheta_2) \right] \end{aligned}$$

При наличии связи между двумя ступенями угловые распределения фотоэлектронов усложняются, и обладают аксиальной симметрией только если направление вылета другого электрона не фиксируется

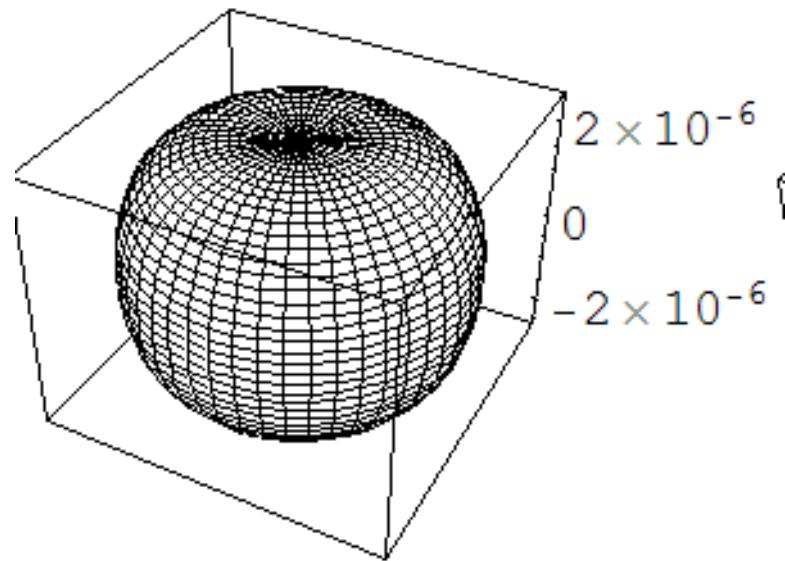
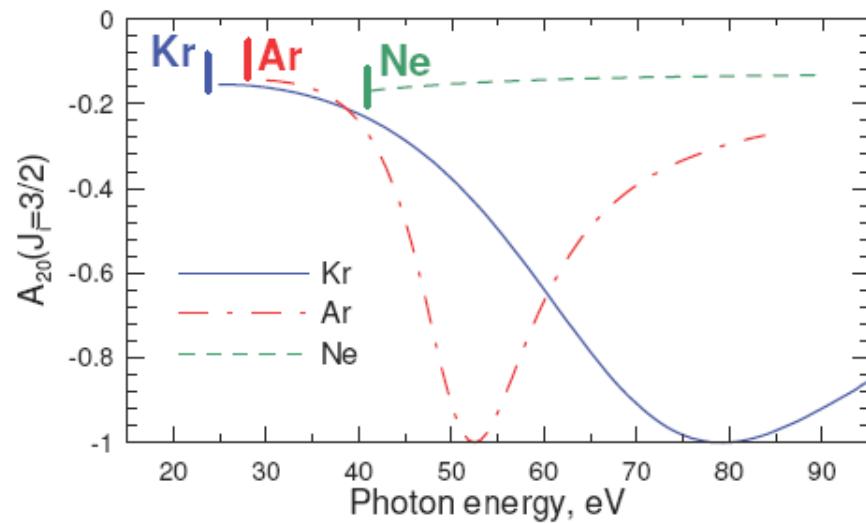
Результаты расчетов угловых распределений второго электрона при ионизации аргона



Исчезновение аксиальной симметрии – проявление связи
между двумя ступенями

Расчет угловой корреляционной функции при энергии, соответствующей максимальной выстроенности

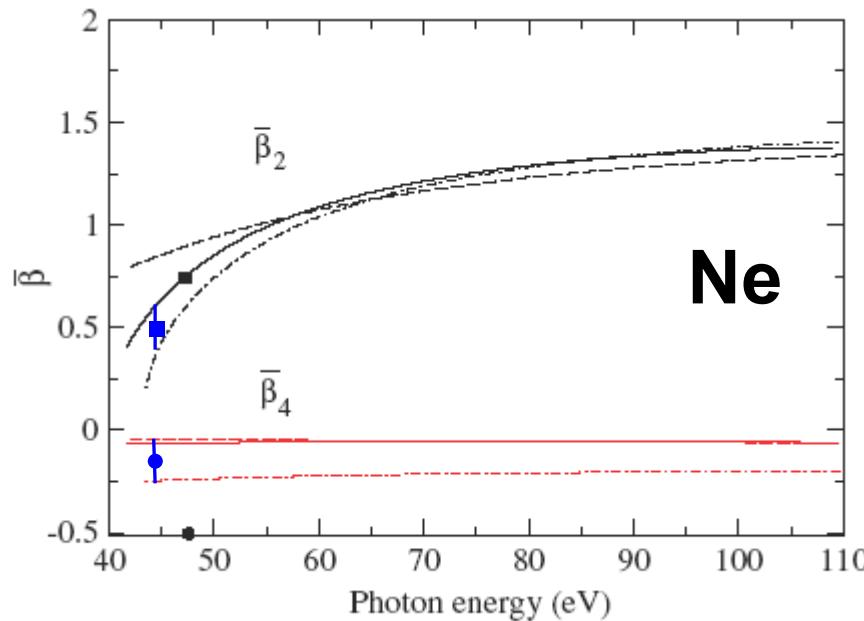
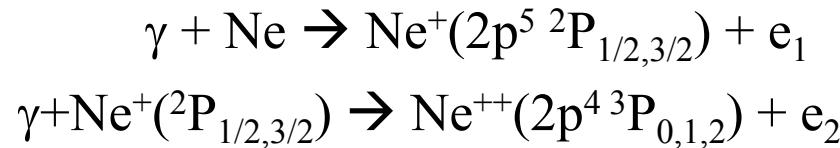
$$\begin{aligned} W(\vartheta_2) &= \sigma_1(J_i) \frac{\sigma_2(J_f)}{4\pi} \left(1 + \beta^{(2)} P_2(\cos \vartheta_2) + A_{20}(J_i) [a_0 + a_2 P_2(\cos \vartheta_2) + a_4 P_4(\cos \vartheta_2)] \right) \\ &= \frac{W_0}{4\pi} \left[1 + \beta_2^{(2)} P_2(\cos \vartheta_2) + \beta_4^{(2)} P_4(\cos \vartheta_2) \right] \end{aligned}$$



Результаты анализа угловых корреляционных функций

- ✓ Угловые распределения фотоэлектронов возникших на первой ступени ионизации зависят от того, произойдет ли вторая ступень ионизации
- ✓ Максимальное значение угловой корреляционной функции, как и самая сложная форма угловых распределений наблюдается не при энергии, соответствующей максимальному значению выстроенности промежуточного иона
- ✓ Исчезает аксиальная симметрия в угловых распределениях фотоэлектронов, которая восстанавливается, если первый электрон вылетает в направлении перпендикулярном поляризации лазерного излучения

Расчет угловых распределений фотоэлектронов в неоне



S. Fritzsche et al, J. Phys. B, **41**, 165601 (2008)

— MCHF

---- MCDF

A. Kheifets, J. Phys. B, **40**, F313 (2007)

---- MCHF

M. Kurka et al (Fast Track Communication JPB, 2009)

● ■ M. Braune et al (ICPEAC, 2007)

$$W(\theta_2) = \frac{W_0}{4\pi} \left(1 + \bar{\beta}_2 P_2(\cos \theta_2) + \bar{\beta}_4 P_4(\cos \theta_2) \right)$$

Сумма по полному моменту промежуточного и конечного состояния иона 2P

Выстроенность промежуточного иона Ne^+ мала

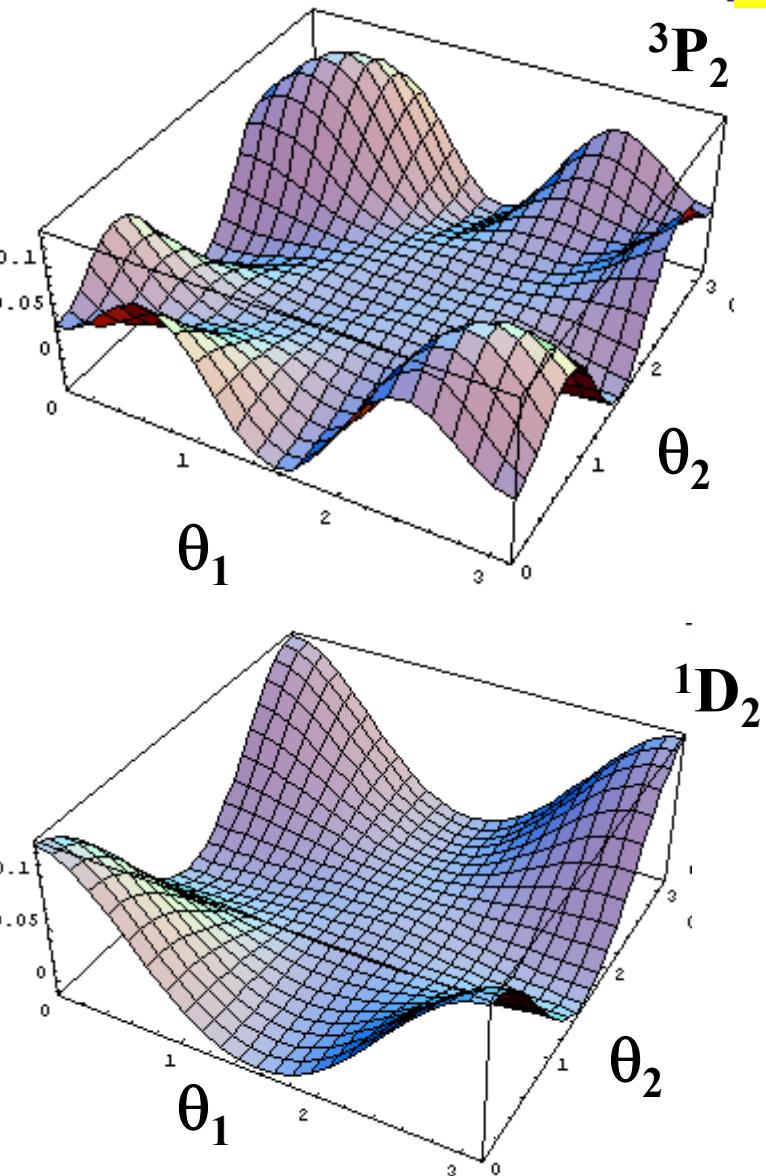
Заключение

Разработан метод расчета угловых распределений электронов в последовательной двойной двухфотонной ионизации атомов.

- ❖ Метод применен к атомам инертных газов Ne, Ar, Kr, Xe; получены как угловые распределения двух фотоэлектронов по отдельности, так и угловые корреляции между ними. Выявлены эффекты выстроенности промежуточного состояния иона на угловые распределения.
- ❖ Сопоставление наших результатов с экспериментами двух групп на атоме неона показало адекватность разработанного метода.
- ❖ Полученные результаты могут быть использованы, и уже используются, в планировании последующих экспериментов на FEL.

Использование FEL дает начало новой области исследований: фотоэлектронной спектроскопии положительно заряженных ионов в газовой фазе, включая спектроскопию углового разрешения и спиновую поляризационную спектроскопию фотоэлектронов

Расчет угловых корреляций (Xe, 29,9 eV)

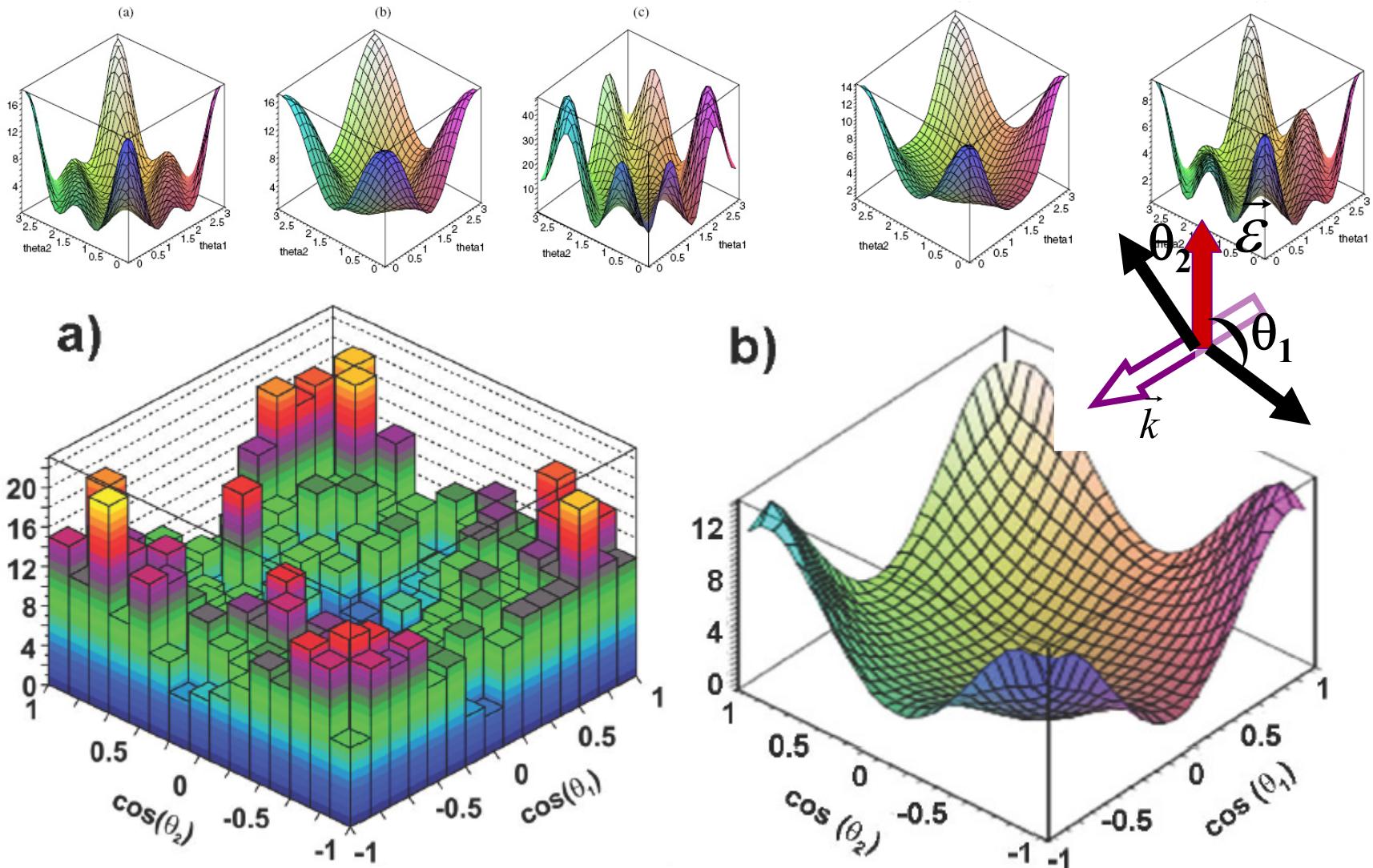


Корреляции электронов будут зависеть от энергии фотонов, состояния конечного и промежуточного иона

$$W(\vartheta_1, 0; \vartheta_2, \varphi_2) = \pi \alpha \omega \sum_{\substack{k_1 k_2 k_{\gamma_2} q_i \\ J_i J'_i}} \times \bar{B}(k_i, k_2, k_{\gamma_2}) \rho_{k_i q_i}(\alpha_i J_i, \alpha'_i J'_i; \vartheta_1, 0) h(J_i, J'_i) \rho_{k_{\gamma_2} 0}^{\gamma} \\ \times (k_i q_i, k_{\gamma_2} 0 \mid k_2 q_i) \sqrt{\frac{4\pi}{2k_2 + 1}} Y_{k_2 q_i}(\vartheta_2, \varphi_2).$$

$$\rho_{k_i q_i}(\alpha_i J_i, \alpha'_i J'_i; \vartheta_1, 0) = \pi \alpha \omega (2J_0 + 1)^{-1} \sum_{k_1 k_{\gamma_1}} B(k_1, k_i, k_{\gamma_1}) \rho_{k_{\gamma_1} 0}^{\gamma} \\ \times (k_i q_i, k_1 - q_i \mid k_{\gamma_1} 0) \sqrt{\frac{4\pi}{2k_1 + 1}} (-1)^{q_i} Y_{k_1 q_i}(\vartheta_1, 0)$$

Расчет угловых корреляций (Ne, 44 eV)



M. Kurka et al (Fast Track Communication JPB, 2009)

Измеренные и рассчитанные угловые корреляционные функции фотоэлектронов

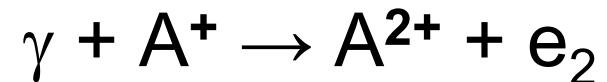
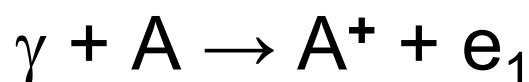
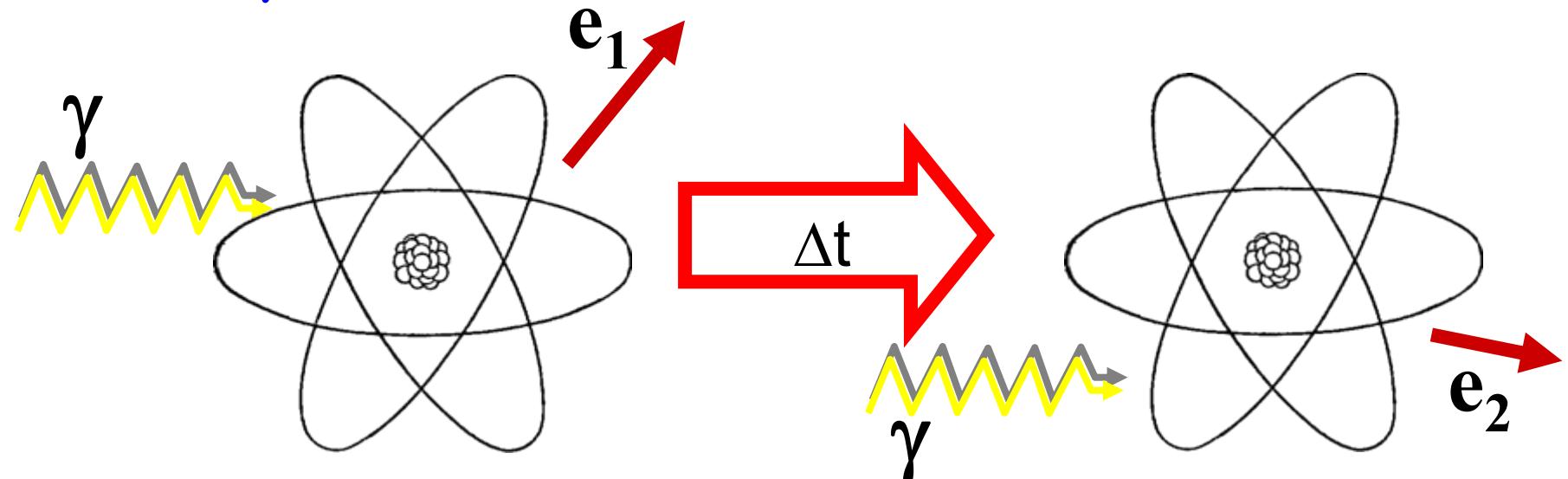
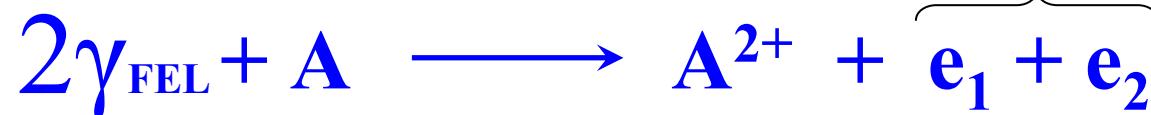
Характеристики источников

	Laser	Synchrotron	HHG	FEL
$\hbar\nu$	IR-UV (1 μm – 300 nm)	IR-X-Ray (1 eV-keV)	IR-XUV <200 eV	VUV-XUV 15-200 eV
$\Delta E/E$	10^{-9}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
ph/s	10^{18}	10^{14}	$10^8\text{--}10^{10}$	10^{15}
ph/pulse	10^{11}	10^7	$10^6\text{--}10^9$	10^{14}
Tunability	Limited	Easy	Limited	Possible
repetition rate	pulsed MHz	pulsed MHZ	pulsed 10 Hz – 10 kHz	pulsed 10 Hz
temporal width	<10 ps	30-50 ps	<1 ps	15 – 200 fs

Фотоэлектронная спектроскопия с FEL

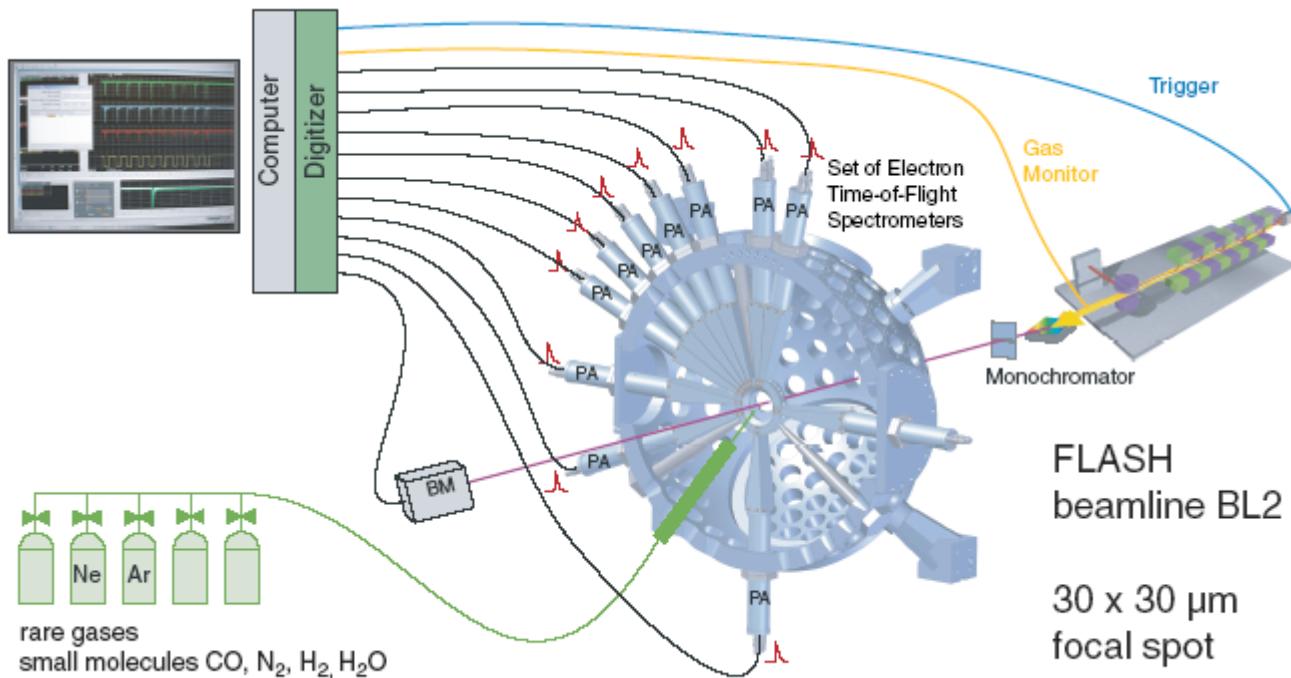
Двойная двухфотонная ионизация

регистрация



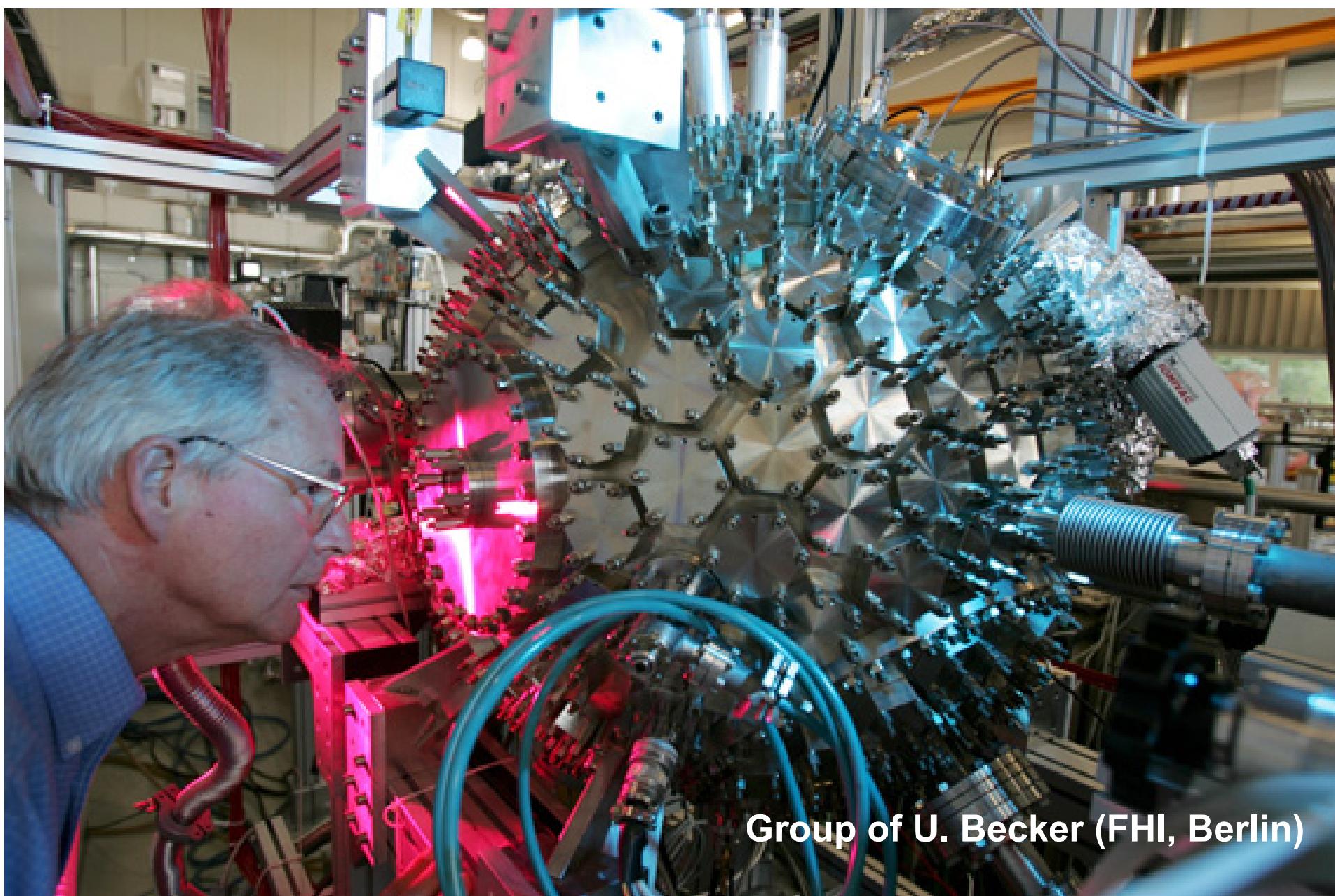
1. Сечения однократной и двойной ионизации
2. Спектры фотоэлектронов
3. Угловые распределения фотоэлектронов
4. Угловые корреляции

Схема эксперимента



Group of U. Becker (FHI, Berlin)

Fig. 1: Sketch of the experimental setup: A spherical multi-detector vacuum chamber with a set of time-of-flight analyzers in the dipol plane at various angles with respect to the polarization axis of the FEL was adjusted to the focus of the beamline. The FEL delivered trains of 30 bunches with a repetition rate of 5 Hz. Bunches were separated by $1\mu\text{s}$ and the single pulse length was 20-50 fs. Data were acquired by recording analog signals of micro channel plate detectors by means of a multi-channel digitizer card system, recording traces in a shot by shot manner which have time duration of a full FEL pulse train. In order to monitor the intensity of every single FEL micro bunch the signal of a calibrated PTB gas detector was recorded as well.



Group of U. Becker (FHI, Berlin)

Первые измерения спектров и угловых распределений фотоэлектронов в двойной многофотонной ионизации

❖ **Fritz-Haber-Institut, MPI, Berlin (Germany)**

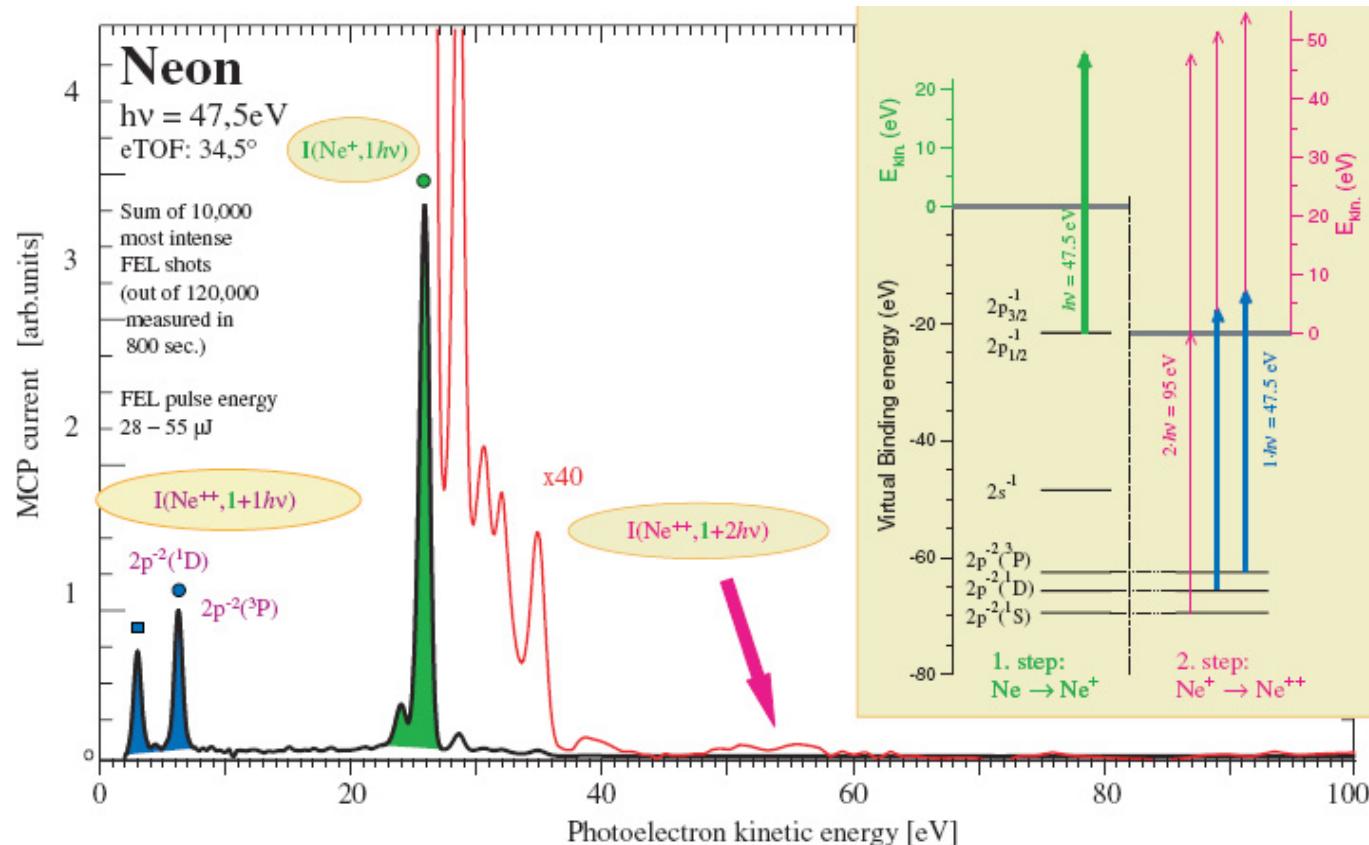
group of Uwe Becker: M. Braune, A. Reinköster, et al;

ICESS-2006, Foz do Iguacu:

Двойная трехфотонная ионизация Ne фотонами с энергией 38 eV

ICPEAC-2007, Freiburg

Двойная двухфотонная ионизация Ne фотонами с энергией 47.5 eV



Первые измерения спектров и угловых распределений фотоэлектронов в двойной многофотонной ионизации

❖ **Fritz-Haber-Institut, MPI, Berlin (Germany)**

group of Uwe Becker: M. Braune, A. Reinköster, et al;

ICESS-2006, Foz do Iguacu:

Двойная трехфотонная ионизация Ne фотонами с энергией 38 eV

ICPEAC-2007, Freiburg

Двойная двухфотонная ионизация Ne фотонами с энергией 47.5 eV

