

# Резонансные процессы в атомах

А. Н. Грум-Гржимайло

- **Резонансы в электронно-атомном (ионном) рассеянии (~1970-2010), включая  $(e, e')$ ,  $(e, e'\gamma)$ ,  $(e, 2e)$ ; с лазерно-возбужденными атомами; резонансы отрицательных ионов; поляризованные электроны; резонансная рекомбинация; ...**

*(В.В. Балашов, В.С. Сенашенко, С.И. Страхова, Н.М. Кабачник, А.И. Магунов, Е.Г. Бережко, А.Н. Грум-Гржимайло, С.М. Бурков, .... )*

- **Резонансы в рассеянии ионов и в электронном захвате**

*(В.С. Николаев, Я.А. Теплова, И.С. Дмитриев, Ю.А. Файнберг, Н.В. Новиков, В.С. Сенашенко, Ш.Д. Куникеев ... )*

- **Лазерно-индуцированные резонансы в атомах**

*(С.И. Страхова, Е.В. Грызлова, А.И. Магунов, ...)*

- **Резонансный эффект Оже**

*(Н.М. Кабачник, А.Н. Грум-Гржимайло, Е.В. Грызлова...)*

## Атомные резонансы, вынужденно оставшиеся «за кадром»:

- **Резонансы в электронно-атомном (ионном) рассеянии (~1970-2010), включая  $(e, e')$ ,  $(e, e'\gamma)$ ,  $(e, 2e)$ ; с лазерно-возбужденными атомами; резонансы отрицательных ионов; поляризованные электроны; резонансная рекомбинация; ...**

*(В.В. Балашов, В.С. Сенашенко, С.И. Страхова, Н.М. Кабачник, А.И. Магунов, Е.Г. Бережко, А.Н. Грум-Гржимайло, С.М. Бурков, .... )*

- **Резонансы в рассеянии ионов и в электронном захвате**

*(В.С. Николаев, Я.А. Теплова, И.С. Дмитриев, Ю.А. Файнберг, Н.В. Новиков, В.С. Сенашенко, Ш.Д. Куникеев ... )*

- **Лазерно-индуцированные резонансы в атомах**

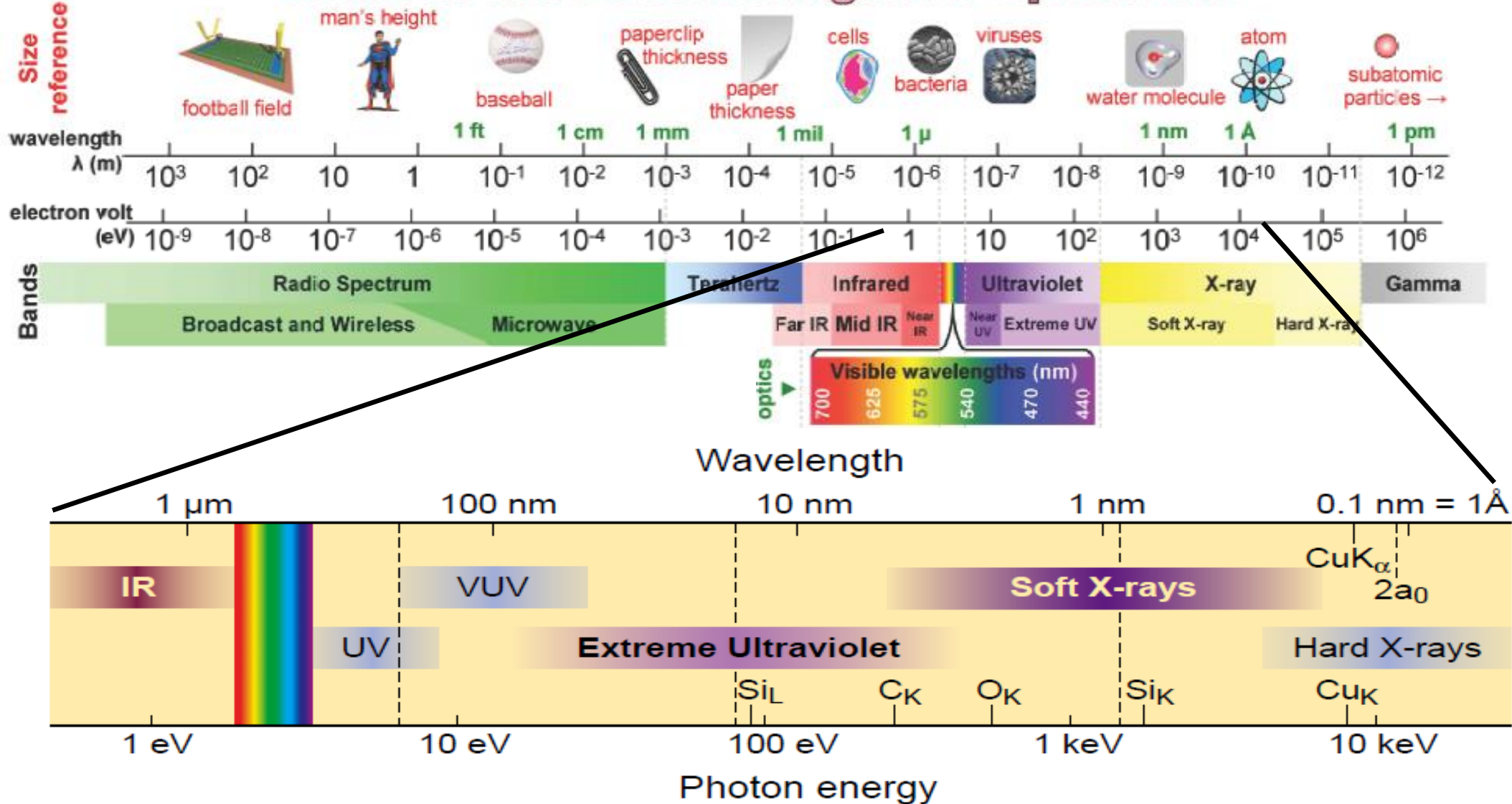
*(С.И. Страхова, Е.В. Грызлова, А.И. Магунов, ...)*

- **Резонансный эффект Оже**

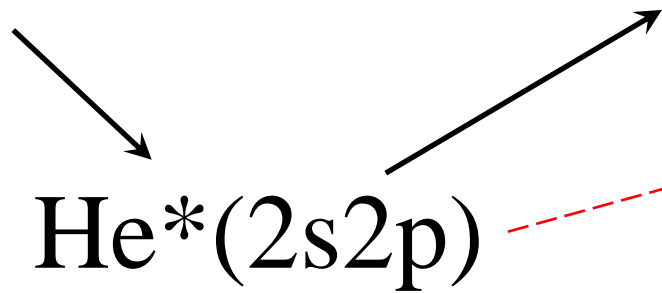
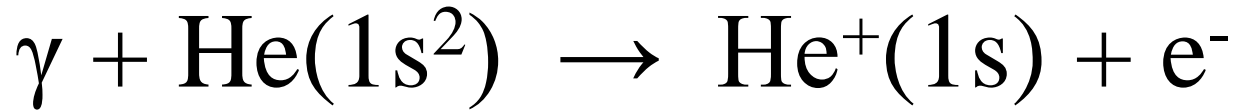
*(Н.М. Кабачник, А.Н. Грум-Гржимайло, Е.В. Грызлова...)*

Осталась – большая часть резонансных явлений в фотопроцессах

# Chart of the Electromagnetic Spectrum



# Фотопоглощение атома гелия выше порога ионизации



порог  
ионизации

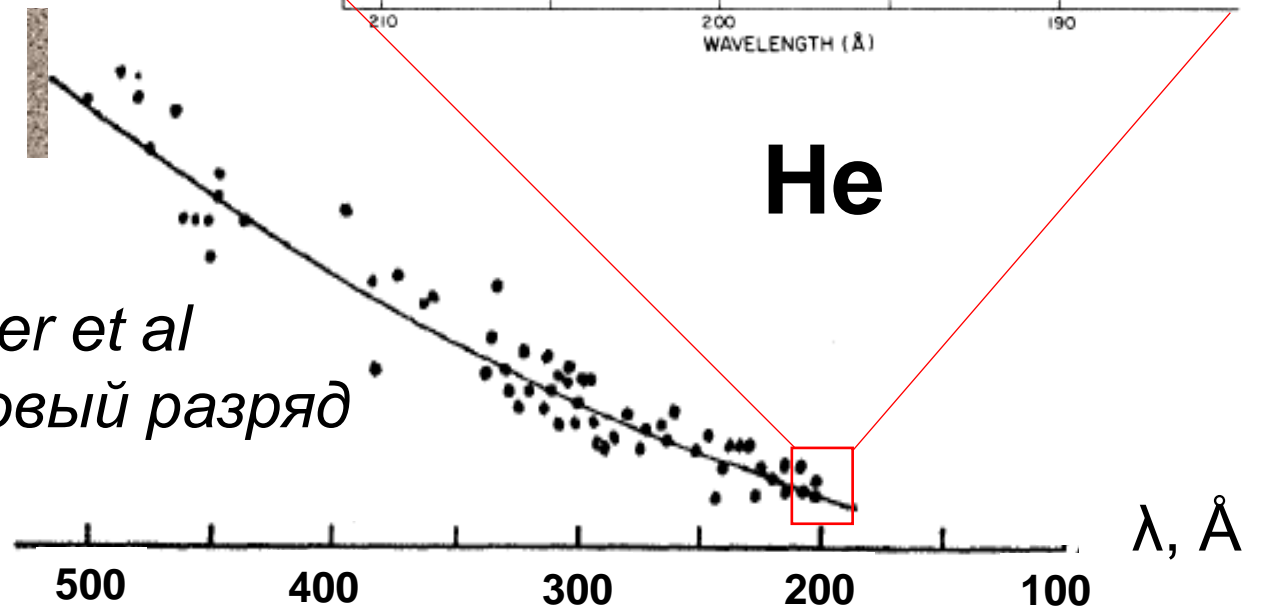
*Madden, Codling*  
синхротронное излучение

1963



*Baker et al*  
газовый разряд

1961





# Диагонализационный метод

Volume 27A, number 2

PHYSICS LETTERS

3 June 1968

POSSIBILITIES OF DIAGONALIZATION METHOD FOR CALCULATING  
THE ATOMIC SYSTEM RESONANCES

V. V. BALASHOV, S. I. GRISHANOVA, I. M. KRUGLOVA and V. S. SENASHENKO

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

*В.В. Балашов*

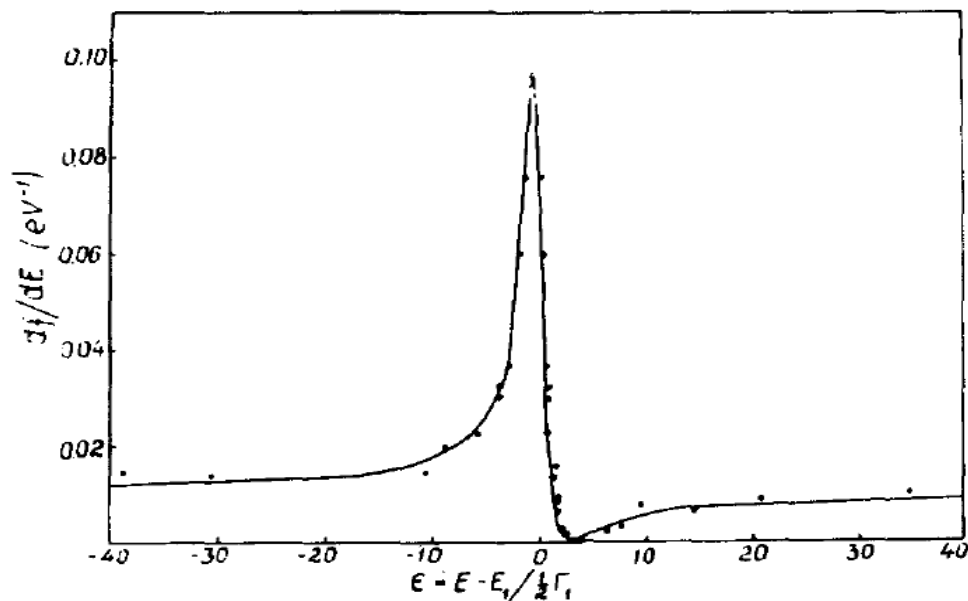


Fig. 1. Photoionization of He in the region of 60.12 eV resonance.

Формула Фано

$$\sigma(E) = \sigma_a \frac{(q + \varepsilon)^2}{\varepsilon^2 + 1} + \sigma_b$$

$$\varepsilon = \frac{E - E_r}{\frac{1}{2} \Gamma}$$

## 1970-е - 1990-е годы

### Лаборатория теоретического практикума:

В.В. Балашов, В.С. Сенашенко, С.И. Страхова, Г.Я. Коренман,  
В.Л. Коротких, Н.М. Кабачник, .... их студенты, аспиранты,  
молодые сотрудники, среди них Е.Г. Бережко, А.И. Магунов,  
А.Н. Грум-Гржимайло, Д.Е. Ланской, С.М. Бурков и др.  
Монгольский ГУ (группа О. Лхагвы),  
Ужгородский ГУ (группы В.И. Лендьела, О.Б. Шпеника),  
Тихоокеанский ГУ (группа С.М. Буркова)

Программа «Университеты России», раздел  
«Автоионизационные явления в атомах» (1992-1996)

Головная организация - НИИЯФ МГУ

(рук. В.В. Балашов, уч. секр. А.Н. Грум-Гржимайло)

Серия всесоюзных совещаний «Автоионизационные явления в атомах» НИИЯФ МГУ 1975, 1980, 1985, 1990;  
в международном формате с участием ученых Германии,  
Франции, Великобритании - Дубна 1995

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics  
Moscow State University

Joint Institute of Nuclear Research in Dubna

---

5th International Workshop

## AUTOIONIZATION PHENOMENA IN ATOMS

Dubna, Russia

December 12-14, 1995

ABSTRACTS

Moscow University Press

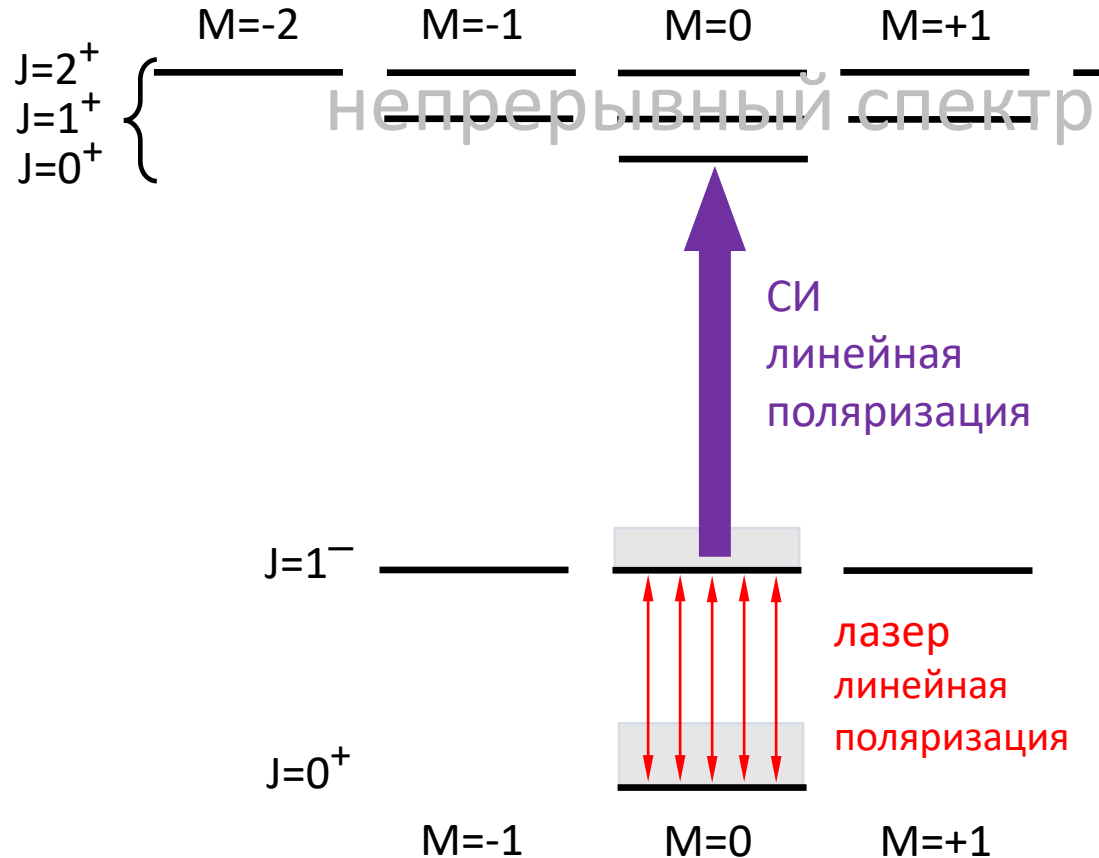
1995

# Комбинированное воздействие оптического лазера и синхротронного излучения

ТОМ 65, ВЫП. 3 . ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ . 1988 год

ПРЯМАЯ И РЕЗОНАНСНАЯ ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ НАТРИЯ  
В СКРЕЩЕННЫХ ПУЧКАХ ЛАЗЕРНОГО  
И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ. ТЕОРИЯ

*Балашов В. В., Грум-Гржимайло А. Н., Жадамба Б.*



*В начале 1990-х начались такие эксперименты на источниках СИ сначала на BESSY (Berlin)*

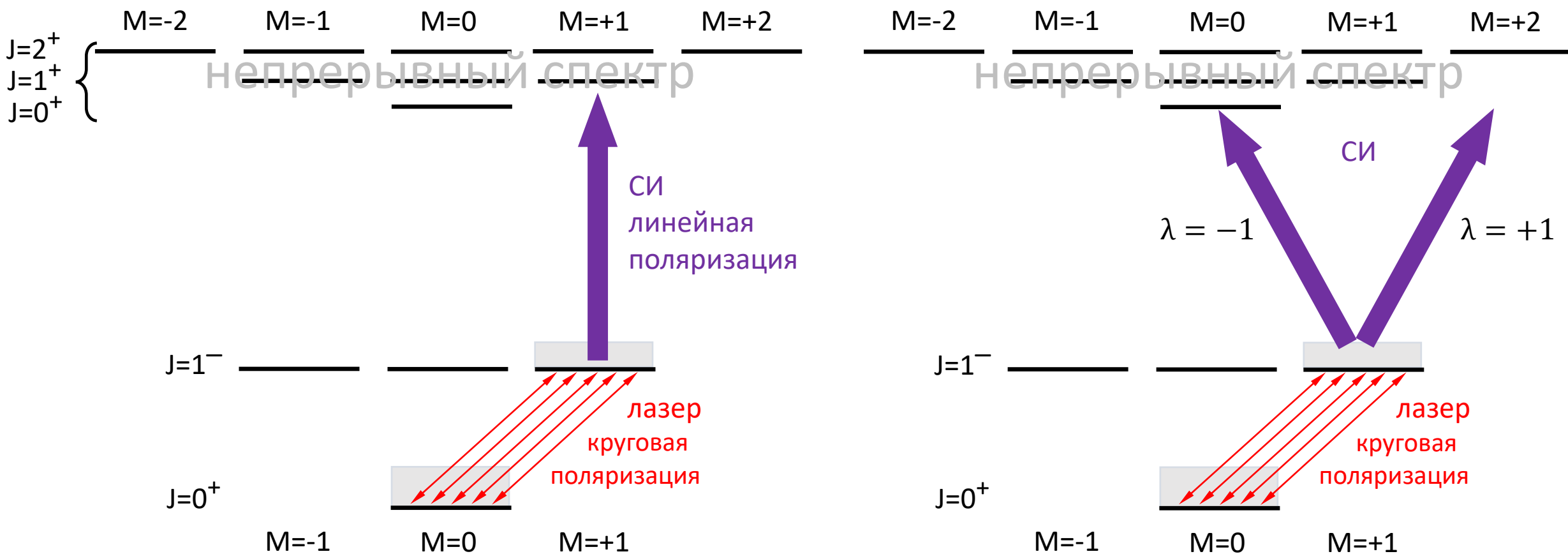
Теоретическая интерпретация и предложения:  
В.В. Балашов, Н.М. Кабачник, А.Н. Грум-Гржимайло

*позже (2000 - ...) на SuperACO (Orsay), SOLEIL (Saint-Aubin)*



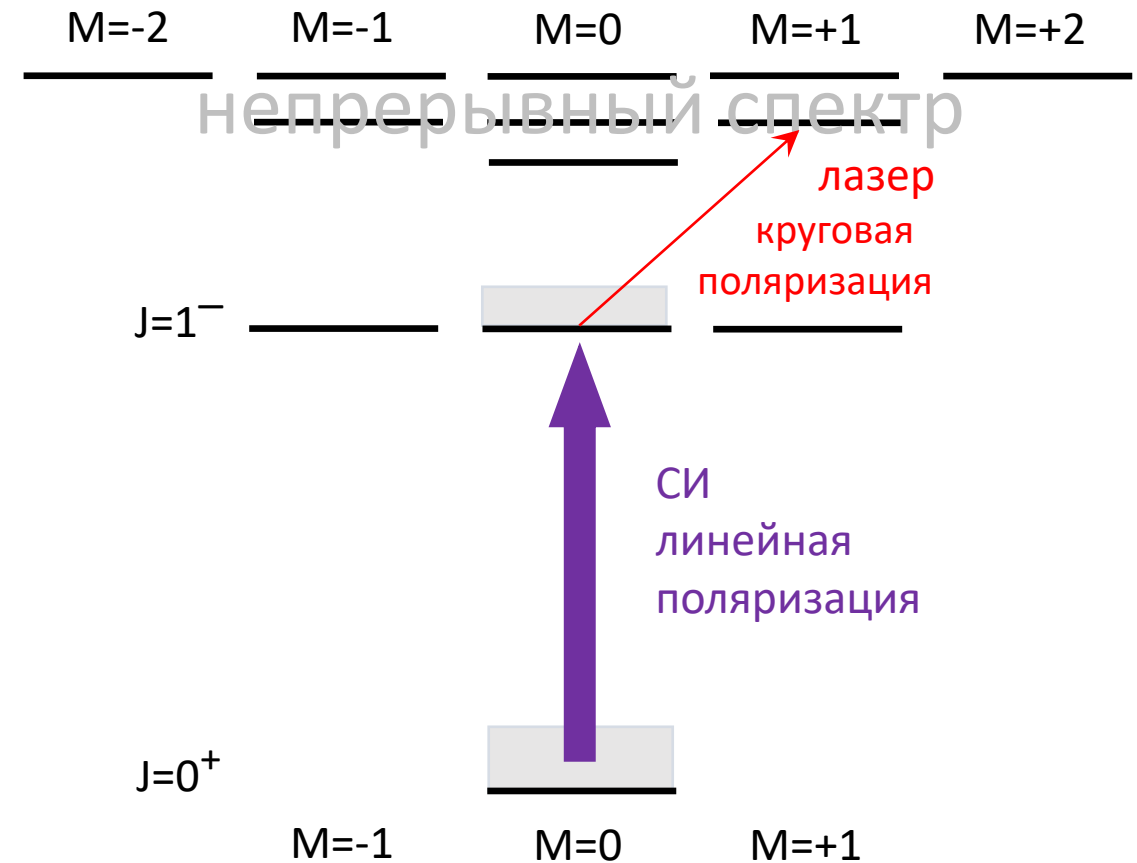
# Комбинированное воздействие оптического лазера и синхротронного излучения

«Играя» на относительной поляризации лазера и СИ и измеряя сечение ионизации и угловые распределения вылетающих электронов, можно получить много новой информации о структуре непрерывного спектра, и не только



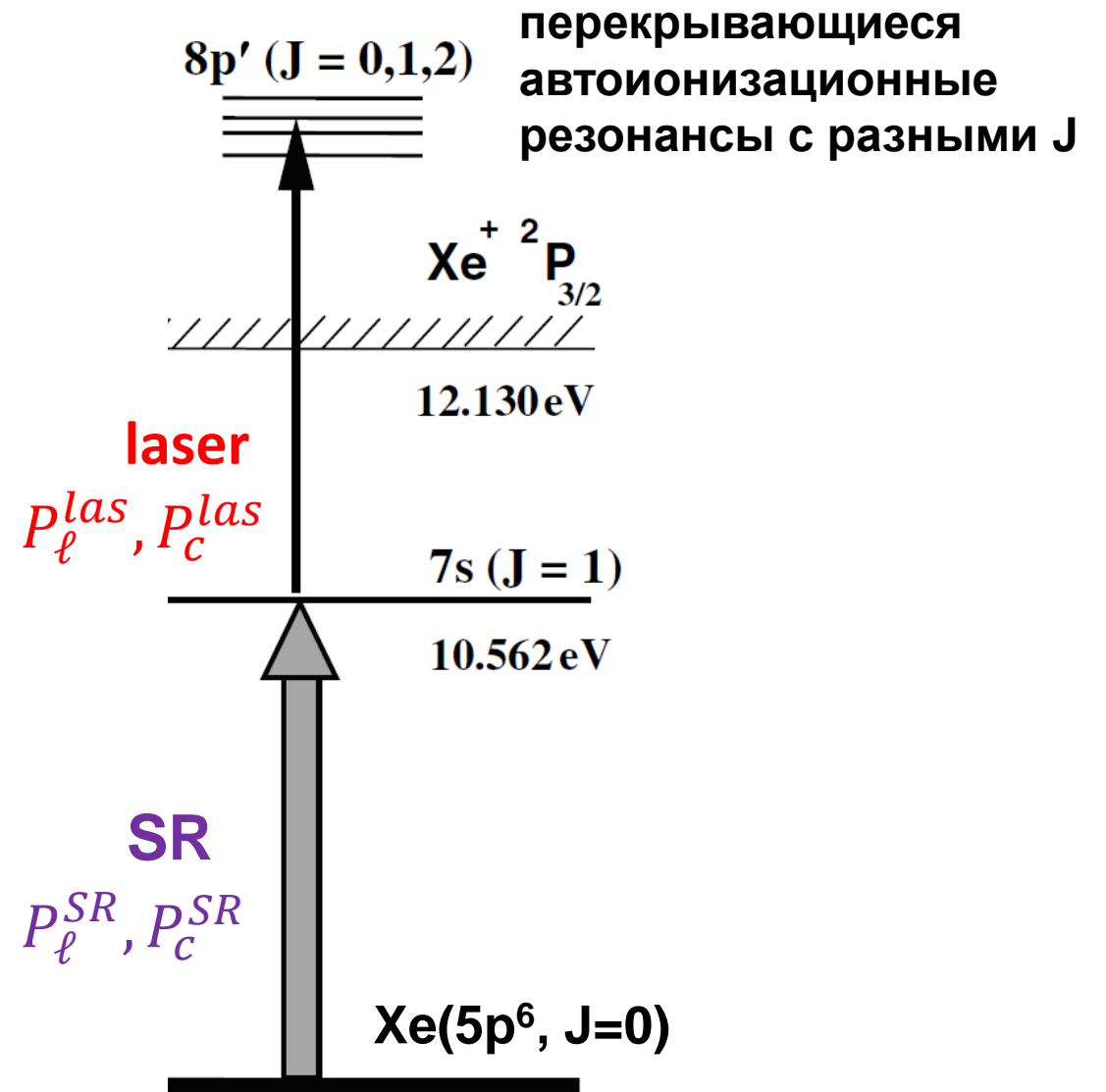
# Комбинированное воздействие оптического лазера и синхротронного излучения

Можно поменять  
схему лазер + СИ на схему СИ + лазер  
(первые эксперименты в 2004)



# Разделение и идентификация резонансов

Эксперимент на SuperACO (Орсэ)  
Теория – НИИЯФ МГУ



# Разделение и идентификация резонансов

$$W = \sigma[1 + \xi_1 P_c^{\text{las}} P_c^{\text{SR}} + \xi_2(1 + 3P_\ell^{\text{las}} P_\ell^{\text{SR}} \cos 2\varphi)]$$

$$\xi_1 = \frac{3}{4\sigma} (2\sigma_0 + \sigma_1 - \sigma_2),$$

$$\xi_2 = \frac{1}{20\sigma} (10\sigma_0 - 5\sigma_1 + \sigma_2).$$

$$\frac{W^{++} - W^{+-}}{W^{++} + W^{+-}} = \frac{\xi_1}{1 + \xi_2} P_c^{\text{las}} P_c^{\text{SR}}$$

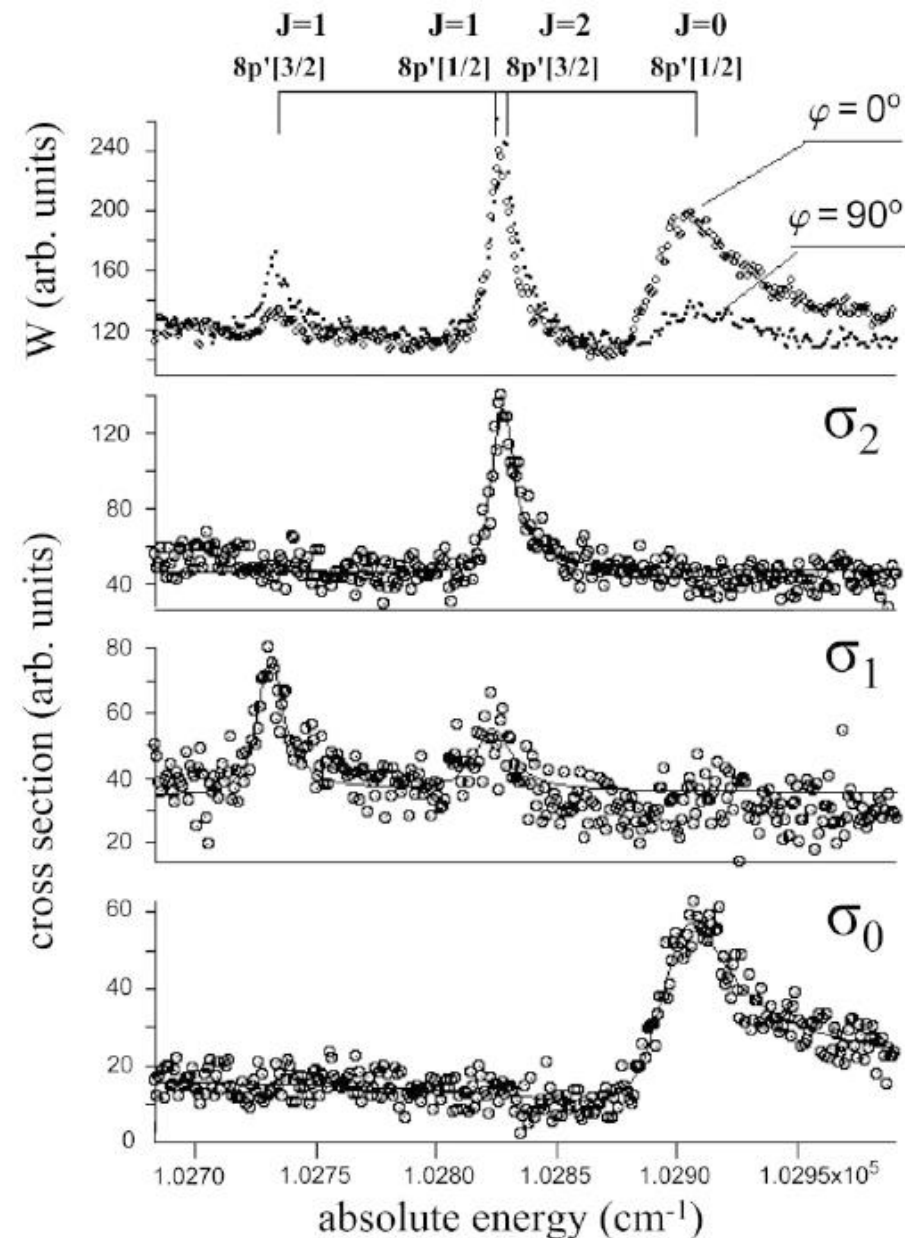
$$\frac{W(0^\circ) - W(90^\circ)}{W(0^\circ) + W(90^\circ)} = \frac{3\xi_2}{1 + \xi_2} P_\ell^{\text{las}} P_\ell^{\text{SR}},$$

$$W(\varphi_0) = \text{const} \times \sigma, \quad \cos 2\varphi_0 = -(3P_\ell^{\text{las}} P_\ell^{\text{SR}})^{-1}$$

PRL 94, 223002 (2005) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 10 JUNE 2005

**Photoionization of Synchrotron-Radiation-Excited Atoms: Separating Partial Cross Sections by Full Polarization Control**

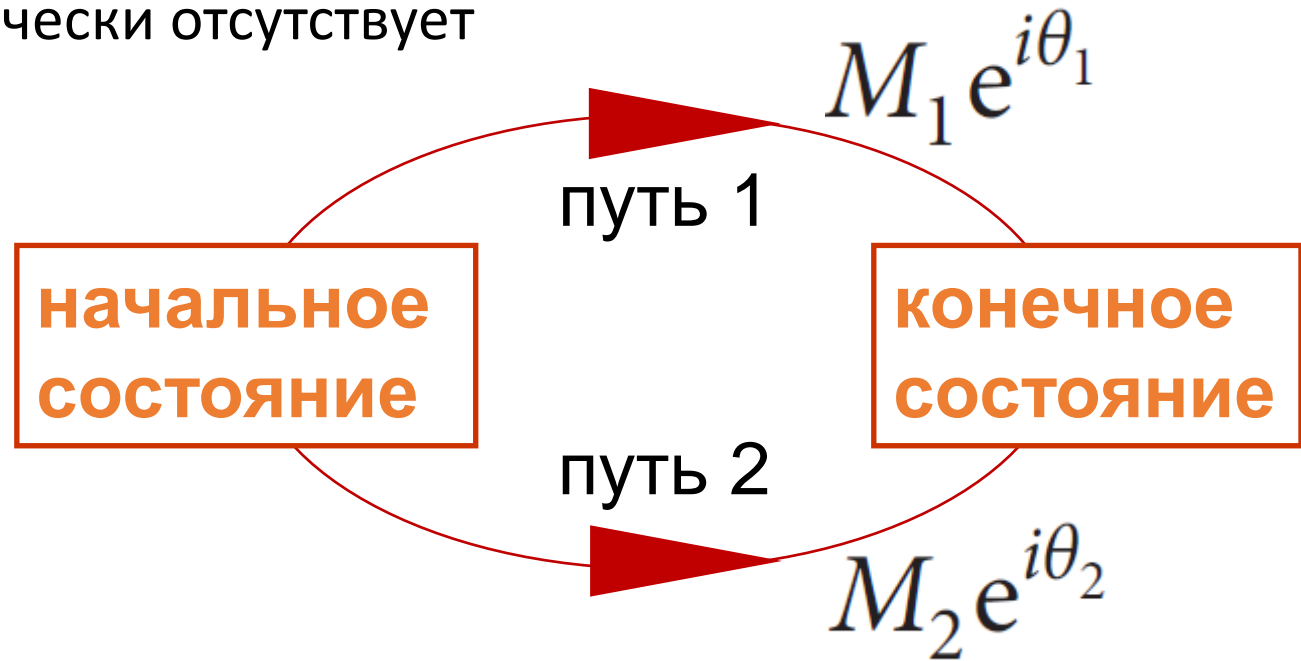
S. Aloïse,<sup>1,2</sup> P. O'Keeffe,<sup>1</sup> D. Cubaynes,<sup>1,3</sup> M. Meyer,<sup>1,2</sup> and A.N. Grum-Grzhimailo<sup>1,4</sup>



# Выявление продольной когерентности излучения рентгеновского лазера на свободных электронах

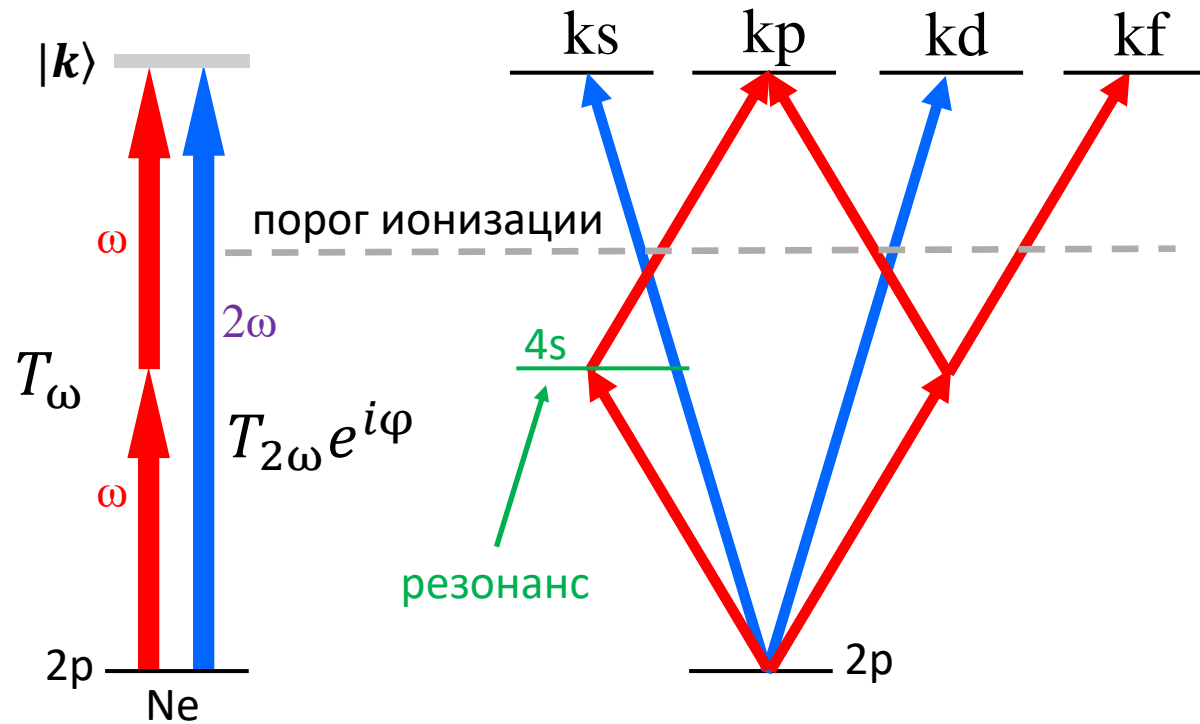
В SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) режиме продольная когерентность практически отсутствует

квантовое управление,  
когерентный контроль,...



$$I \sim |M_1 e^{i\theta_1} + M_2 e^{i\theta_2}|^2$$
$$= |M_1|^2 + |M_2|^2 + 2|M_1||M_2| \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\mathbf{E}(t) = F(t) [\mathbf{E}_\omega \cos \omega t + \mathbf{E}_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi)]$$



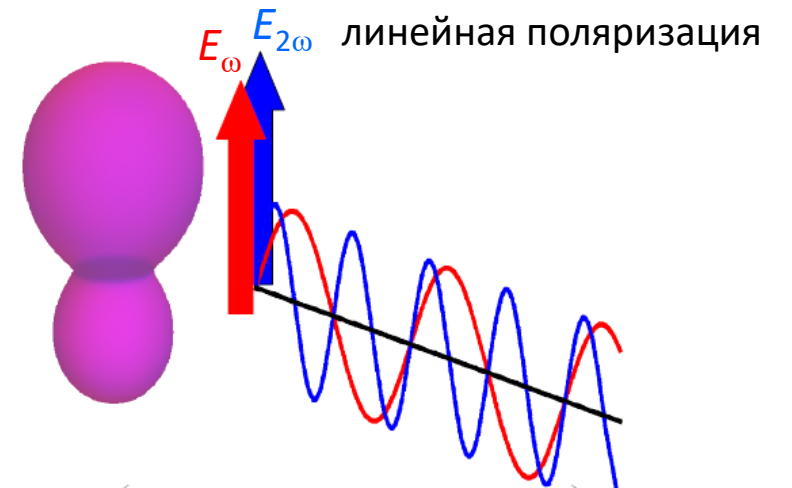
$$I = |T_\omega + T_{2\omega} e^{i\varphi}|^2$$

$$= |T_\omega|^2 + |T_{2\omega}|^2 + 2|T_\omega||T_{2\omega}| \cos \varphi$$

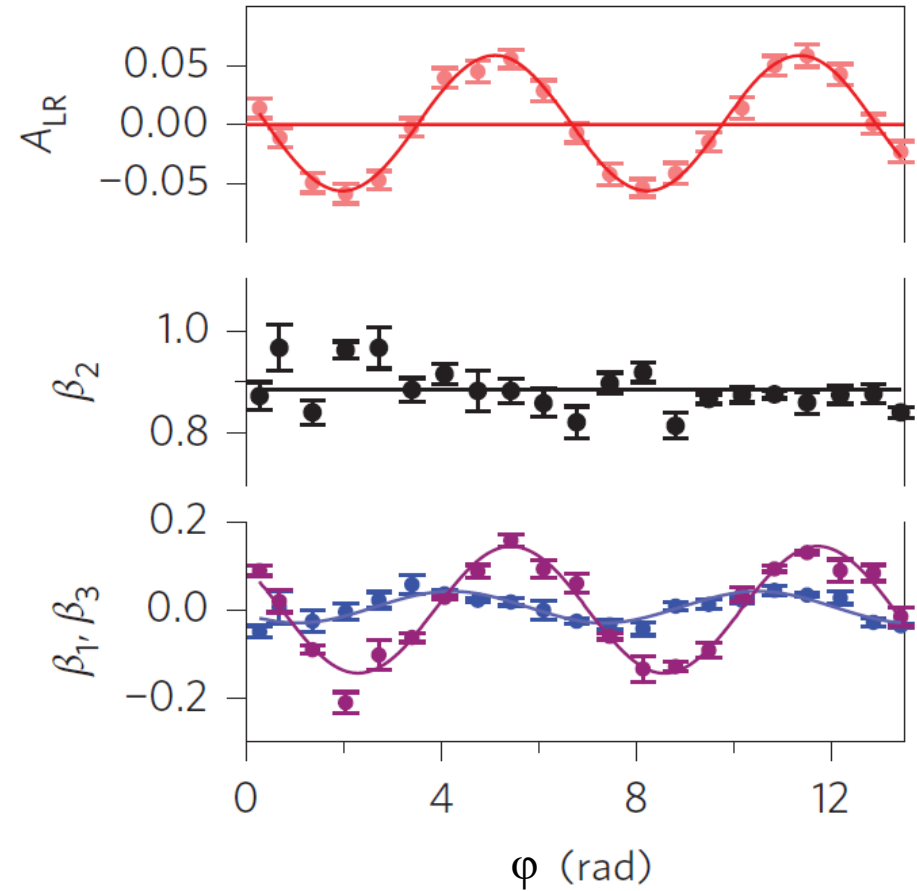
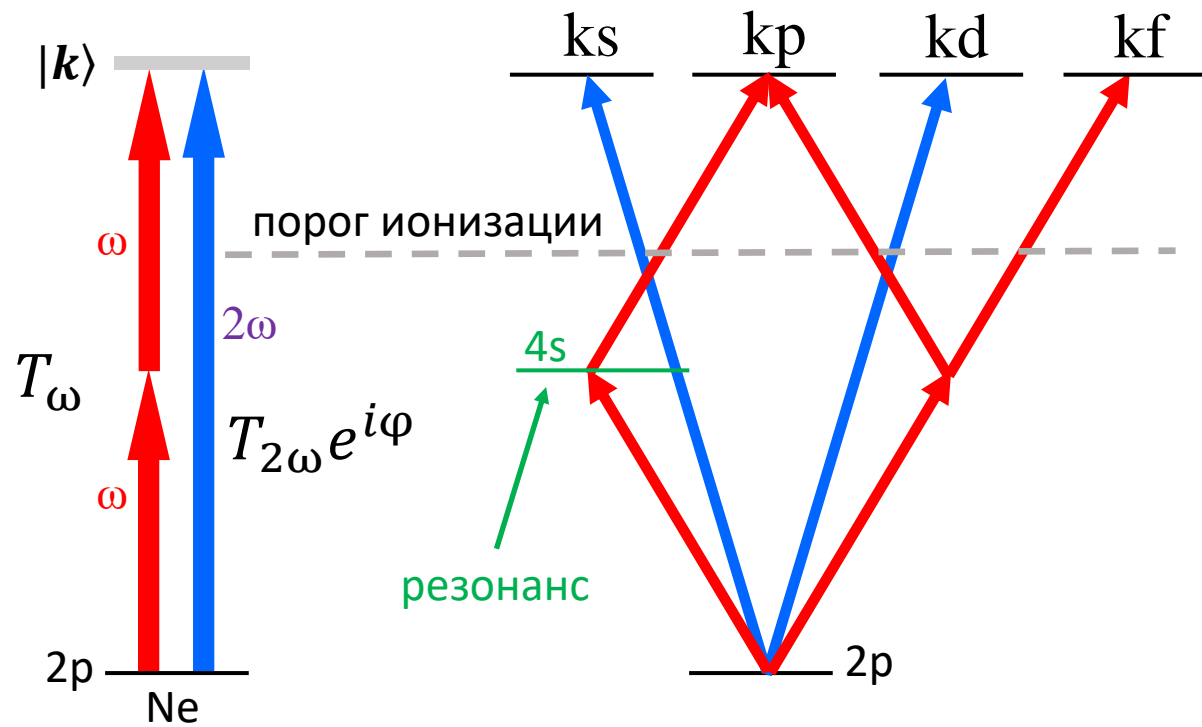
Интерференция амплитуд путей с разной четностью приводит к асимметрии

$$\frac{dW}{d\Omega} = \frac{W_0}{4\pi} \left[ 1 + \sum_{k=1}^K \beta_k P_k(\cos \theta) \right]$$

$$A(\theta) = \frac{I(\theta) - I(180^\circ - \theta)}{I(\theta) + I(180^\circ - \theta)}$$



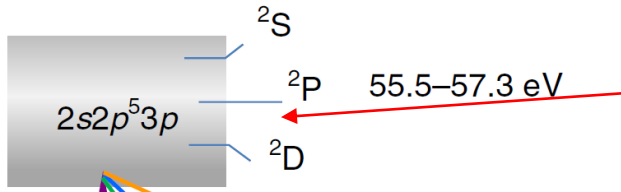
$$E(t) = F(t) [E_{\omega} \cos \omega t + E_{2\omega} \cos(2\omega t + \varphi)]$$



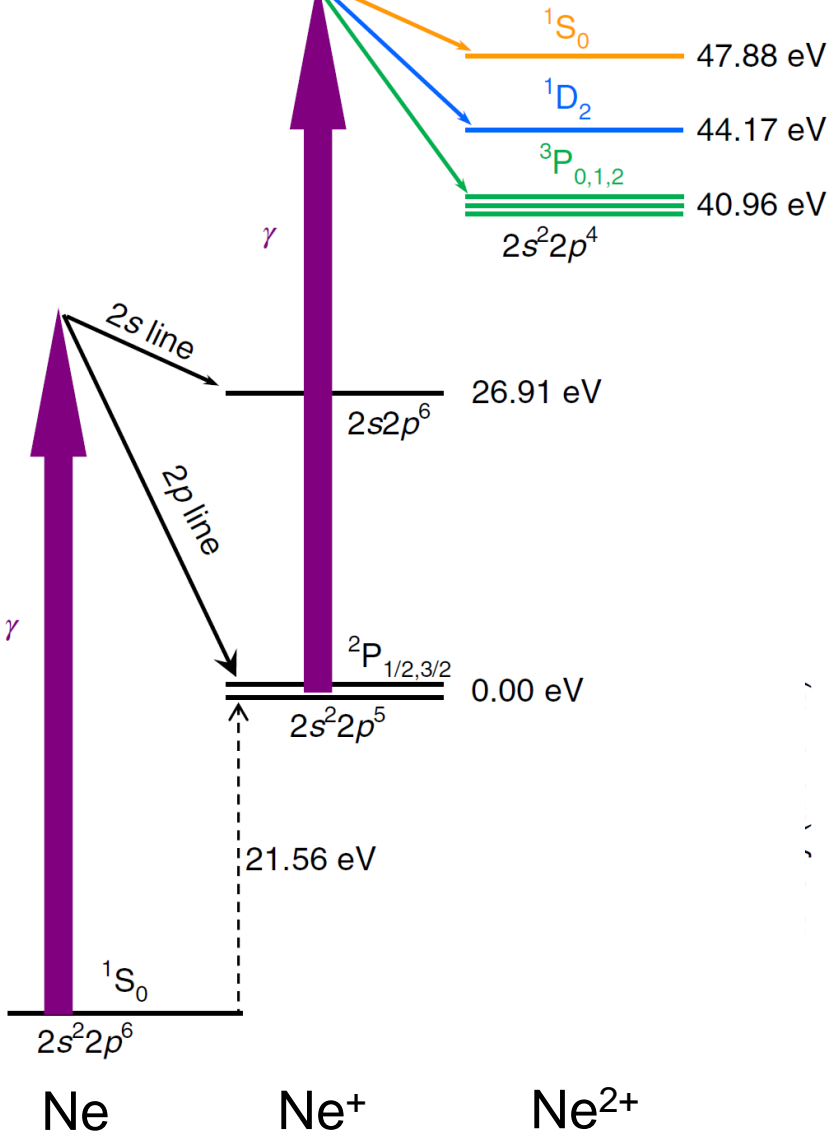
Coherent control with a short-wavelength free-electron laser

*K.C. Prince et al, Nature Photonics* **10**, 176 (2016)

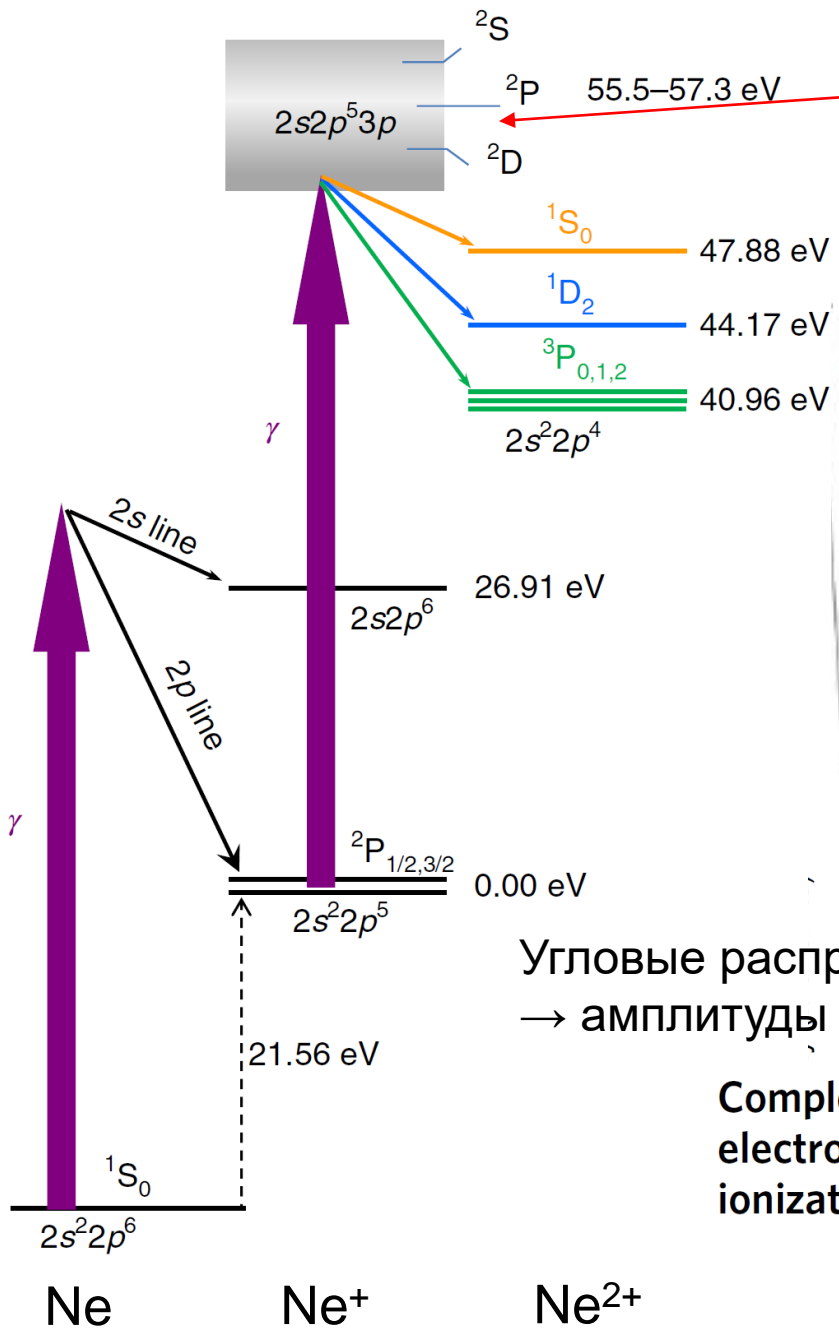
Эксперимент на FERMI,  
Теория – НИИЯФ МГУ



Электронное облако вот здесь в непрерывном спектре. Какое оно в резонансе и вне резонанса?



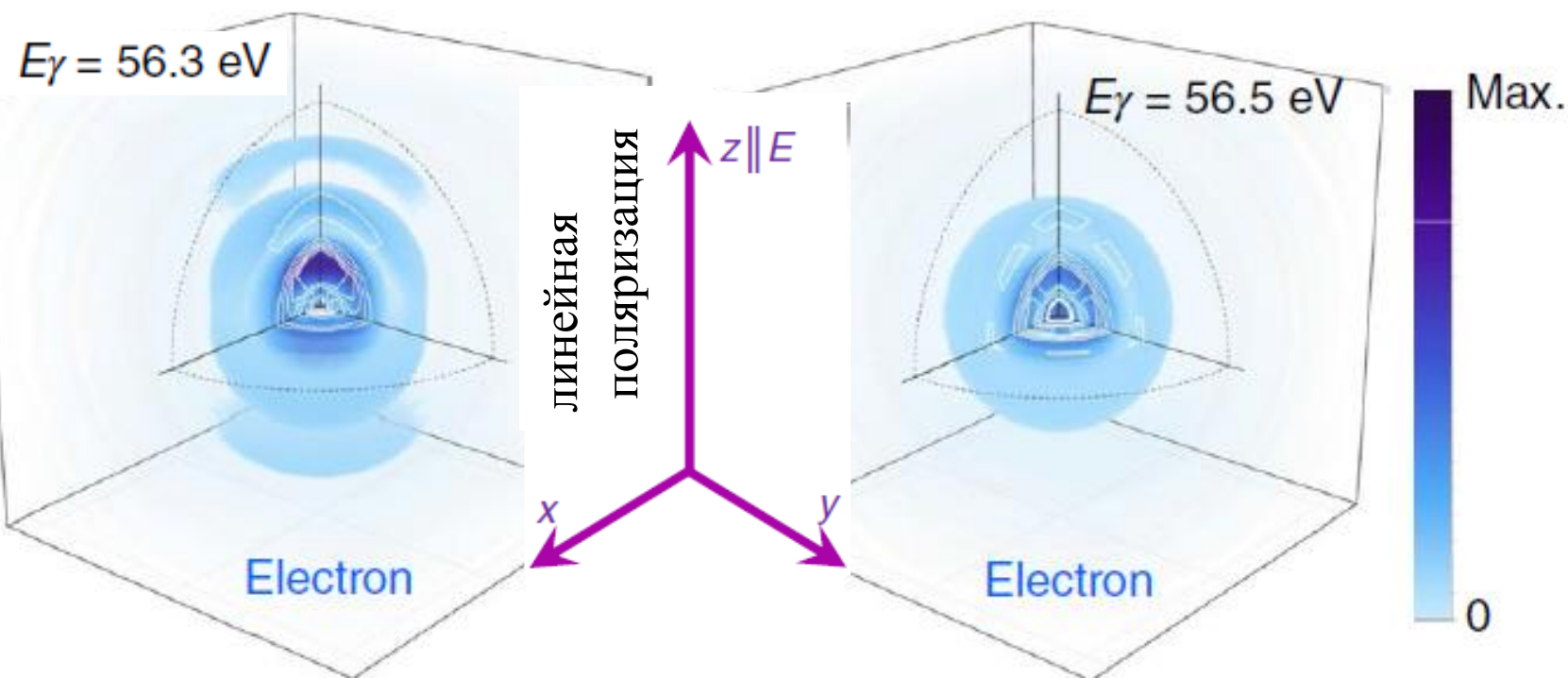




нашли электронное облако вот здесь в непрерывном спектре

вне резонанса

в резонансе



Угловые распределения электронов при фотоионизации поляризованного состояния → амплитуды фотоионизации → любая наблюдаемая (например, электронное облако)

Complete reconstruction of bound and unbound electronic wavefunctions in two-photon double ionization

Эксперимент на FERMI (Триест), Теория – НИИЯФ МГУ

P.A. Carpegiani et al, Nature Physics 15, 170 (2019)

## Десять значимых событий 2020 года в физике и астрономии

### 3. Необычное поведение ядерных сил на сверхмалых расстояниях

В феврале большая международная команда физиков коллаборации CLAS, работающая с данными, полученными ускорителем частиц Лаборатории Джефферсона (США), сообщила в журнале «Nature» о необычном взаимодействии нуклонов (протонов и нейтронов). Оказалось, что сильное взаимодействие, связывающее нуклоны в ядрах атомов, может их не только притягивать, но и отталкивать, когда расстояние между ними крайне мало. Открытие имеет огромное значение для понимания ядерных систем в целом и компактных космических объектов вроде нейтронных звёзд в частности.

Особенность ядерных сил — крайне малый радиус действия (10–13 см), что на порядок меньше размера тяжёлых ядер. Так что, с точки зрения этих сил, большинство нуклонов даже в крошечном ядре атома расположены достаточно далеко друг от друга. В данном исследовании физики впервые смогли подробно изучить, что происходит с сильным взаимодействием на сверхкоротких расстояниях.

Россию в коллаборации CLAS представляют Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (ИТЭФ) и НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына (НИИЯФ) МГУ.



*Детектор CLAS диаметром 9 м окружает мишень, в которую попадают ускоренные электроны. Вылетающие из мишени частицы измеряются слоями детекторов частиц разных типов.*

*Фото: JLab.*

## Десять значимых событий 2020 года в физике и астрономии

### 4. Лазеры достигли аттосекундного диапазона

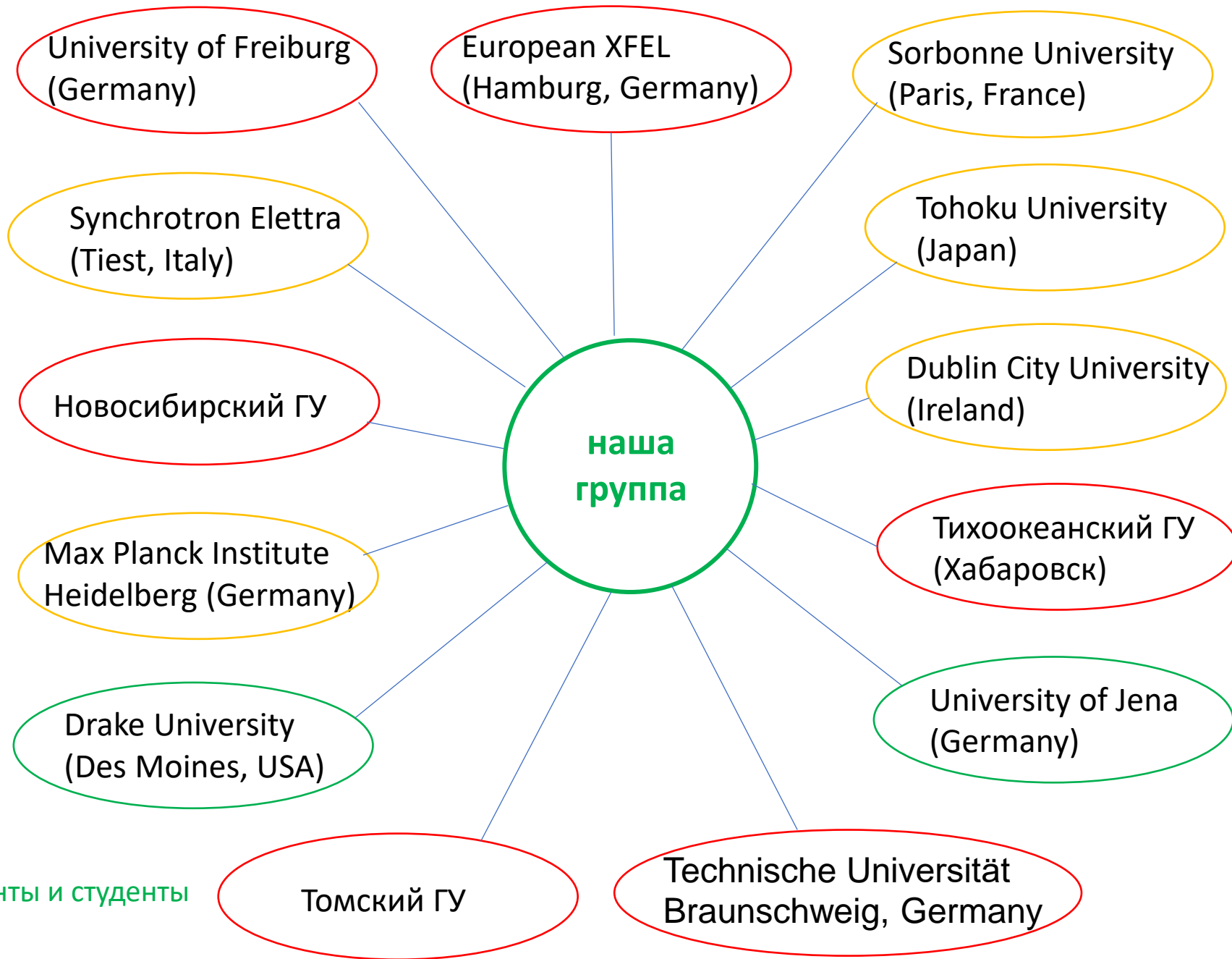
Для изучения очень быстрых процессов, подобных движению электронов в веществе, нужен инструмент, работающий на порядок быстрее. Движения электронов в атомах происходят за время порядка нескольких аттосекунд ( $1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$ ). Это время настолько мало, что свет за  $1 \text{ ас}$  проходит расстояние, соответствующее всего лишь размеру атома.

Такие процессы физики исследуют и управляют ими с помощью коротких лазерных импульсов. Для этого излучение лазера должно иметь очень высокую частоту и малую длину волны. Подходящие импульсы генерируют так называемые рентгеновские лазеры на свободных электронах, но их длительность до сих пор превышала 10 фемтосекунд ( $1 \text{ фм} = 1000 \text{ ас}$ ). Трудную задачу заставить их генерировать более короткие импульсы с заданными свойствами решила международная команда исследователей, в которую вошли и российские физики. Результаты работы опубликованы в феврале в журнале «Nature». **Сотрудники НИИЯФ МГУ** Алексей Грум-Гржимайло и Елена Грызлова внесли определяющий вклад в теоретическое обоснование метода, экспериментально реализованного на рентгеновском лазере на свободных электронах FERMI (Триест, Италия).

Разработанный метод генерации импульсов основан на сложении электромагнитных волн рентгеновского диапазона с частотами, подобранными так, что результирующее колебание будет иметь вид очень коротких всплесков с длительными паузами. Рентгеновское излучение лазера на свободных электронах возникает при прохождении электронных сгустков, создаваемых линейным ускорителем, через настраиваемые ондуляторы — последовательности («гребёнки») магнитов.



Ондулятор рентгеновского лазера на свободных электронах FERMI. Фото: Elettra.



«наша группа»:  
А.Н. Грум-Гржимайло,  
Е.В. Грызлова + аспиранты и студенты

**Спасибо за внимание**