

# Аттосекундная метрология, достижения и перспективы

Е.В. Грызлова

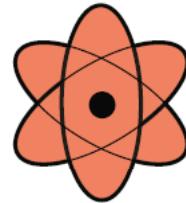
М.М. Попова, С.Н. Юдин, М.Д. Киселев, Ф.Н. Грум-гржимайло



21 декабря, Москва, Россия

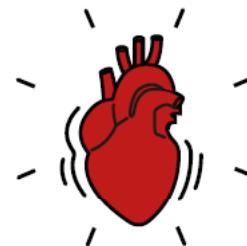
*Семинар НИИ ядерной физики имени Д.В. Скobelьцина*

# Аттосекунда



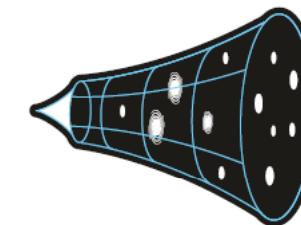
ATTOSECOND

1/1,000,000,000,000,000,000  
SECOND



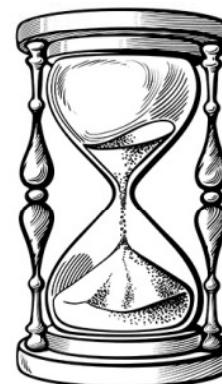
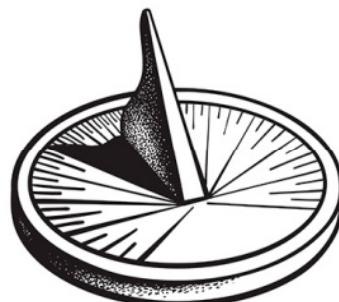
HEARTBEAT

1 SECOND



AGE OF THE UNIVERSE

1,000,000,000,000,000  
SECONDS



THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2023  
POPULAR SCIENCE BACKGROUND

# Начало фотографии

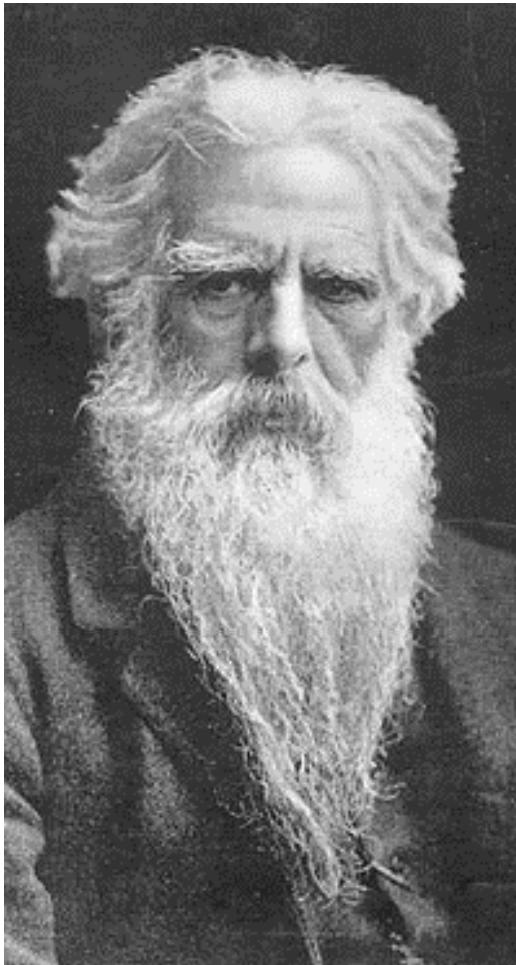
---



Луи Даггер 1838

# Начало хронофотографии

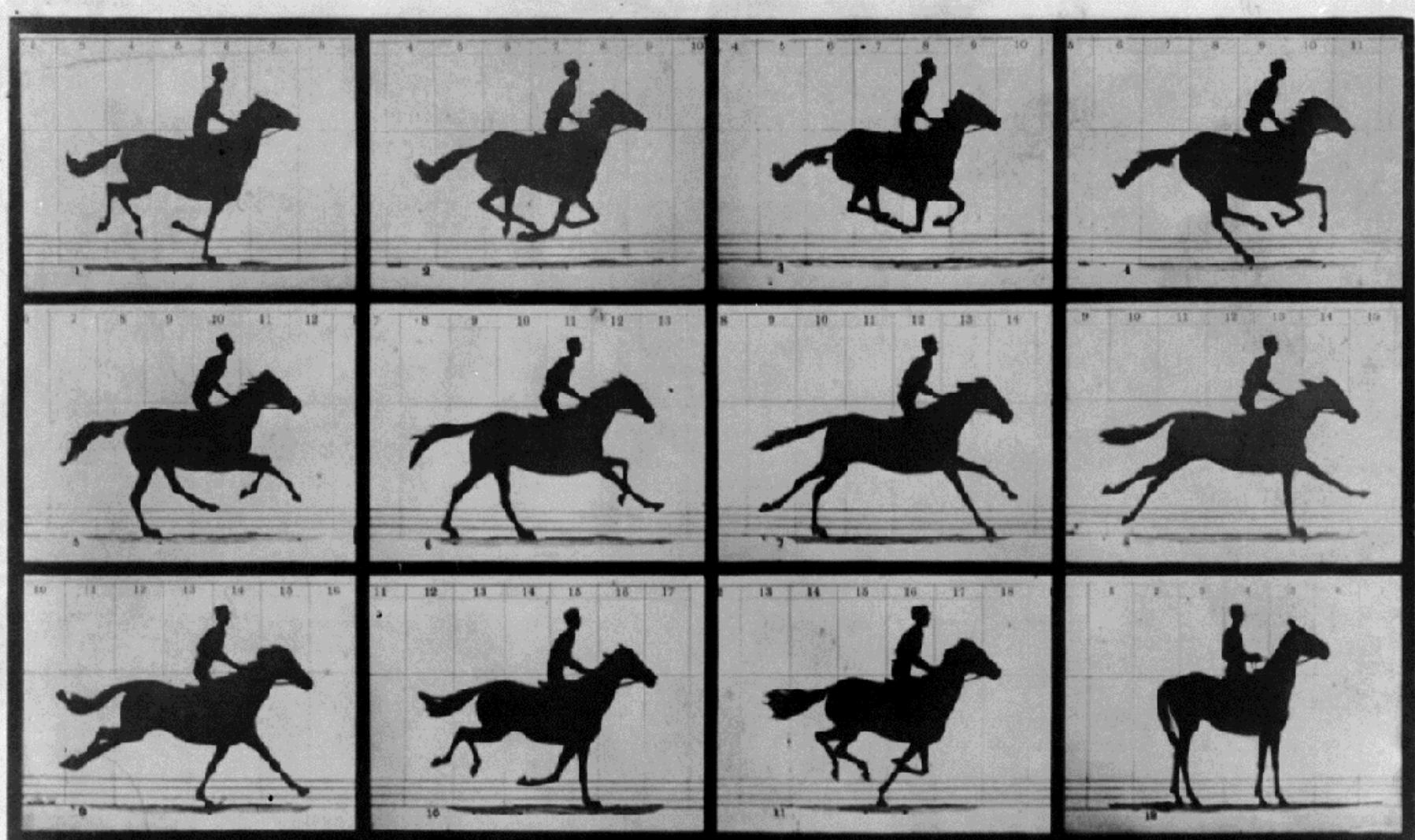
---



**Эдвард Мейбридж**  
Eadweard Muybridge  
(1830-1904)



**Лиленд Стенфорд**  
Leland Stanford  
(1824-1893)



Copyright, 1878, by MUYBRIDGE.

MORSE'S Gallery, 417 Montgomery St., San FRANCISCO.

## THE HORSE IN MOTION.

Illustrated by  
MUYBRIDGE.

"SALLIE GARDNER," owned by LELAND STANFORD; running at a 1.40 gait over the Palo Alto track, 19th June, 1878.

The negatives of these photographs were made at intervals of twenty-seven inches of distance, and about the twenty-fifth part of a second of time; they illustrate consecutive positions assumed in each twenty-seven inches of progress during a single stride of the mare. The vertical lines were twenty-seven inches apart; the horizontal lines represent elevations of four inches each. The exposure of each negative was less than the two-thousandth part of a second.

# Начало хронофотографии

---



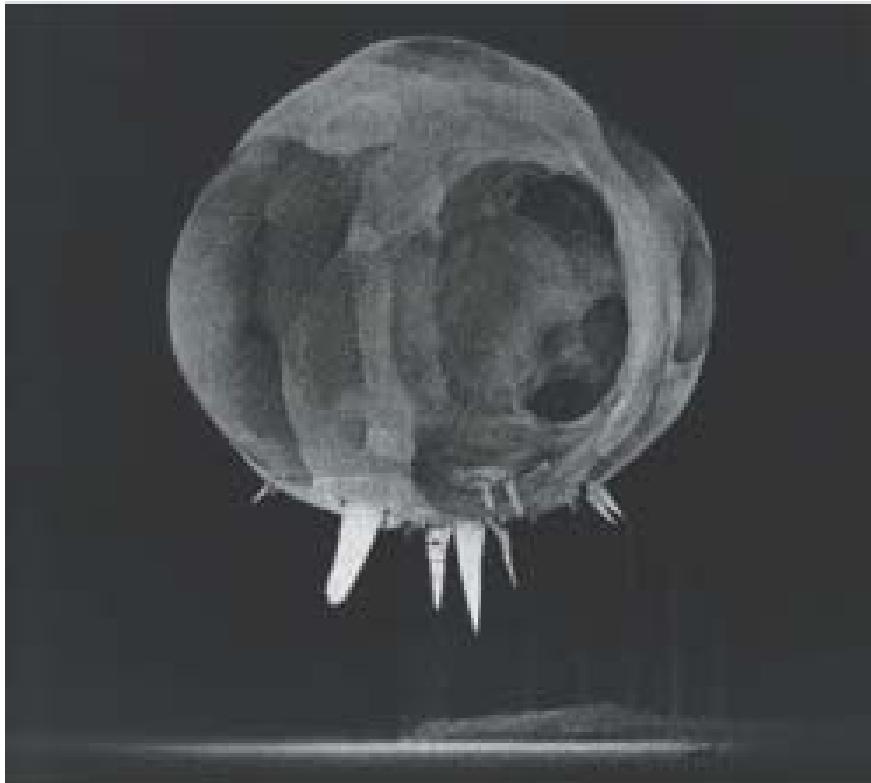
Скорость затвора 6 миллисекунд ( $6 \cdot 10^{-3}$ ), 1878

# Развитие хронофотографии



# Развитие хронофотографии

---



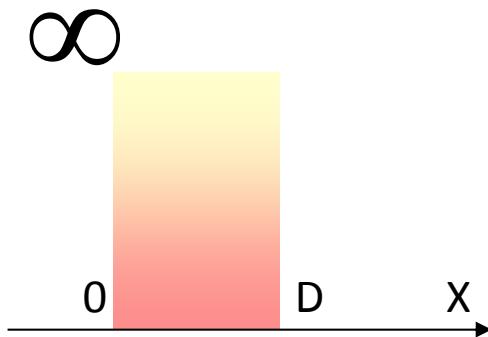
Ядерный взрыв; скорость затвора Керра в камере  
- до 10 наносекунд ( $10^{-8}$ ). Harold Edgerton, 1952



Гарольд Эджертон  
Harold Edgerton  
1903 – 1990

# Оценка времени эволюции пакета

Эволюция пакета в прямоугольном потенциале

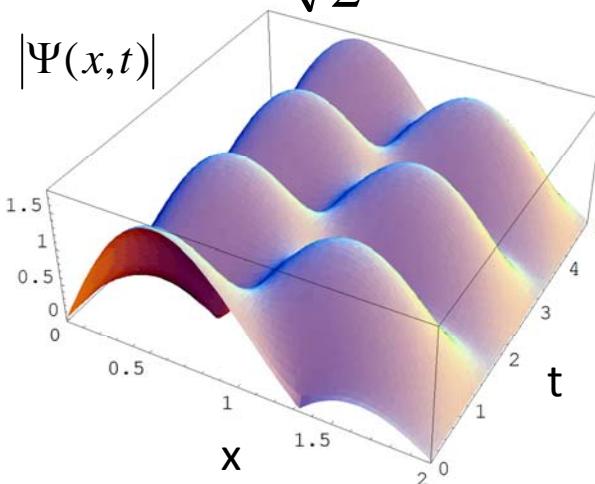
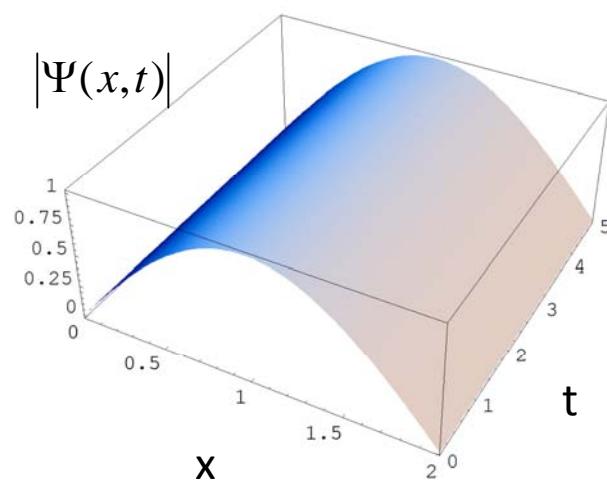


$$E_n = \frac{\pi^2 n^2}{2D^2}, \psi_n(x) = \sin \sqrt{2E_n} x$$

$$\Psi(x,t) = \sum_n a_n \exp(-iE_n t) \psi_n(x); \quad a_n = \int \Psi(x,0) \psi_n(x) dx$$

$$\Psi(x,0) = \psi_1(x)$$

$$\Psi(x,0) = \frac{\psi_1(x) + \psi_2(x)}{\sqrt{2}}$$

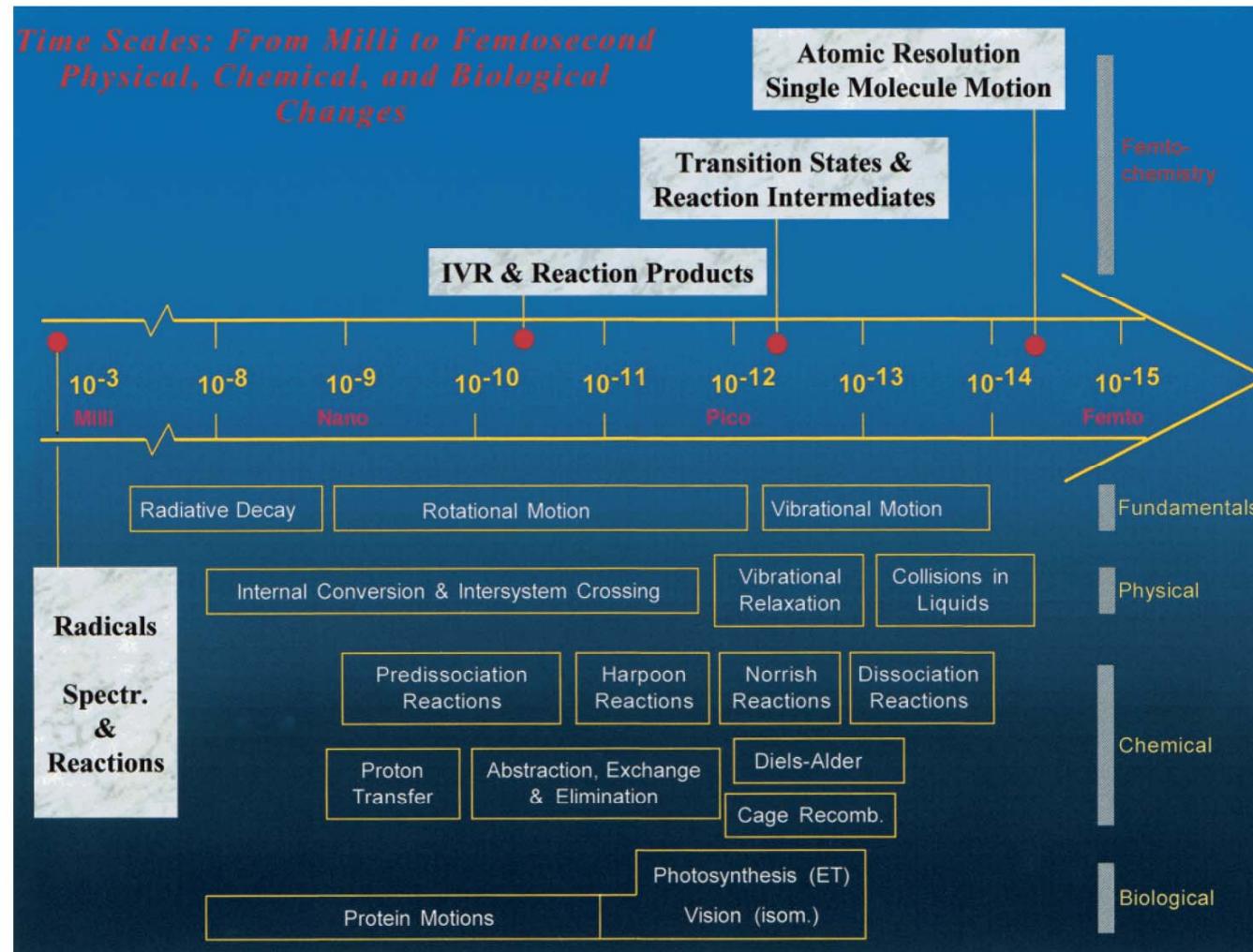


# Фемтохимия

Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond<sup>†</sup>

Ахмед Зевайл (Ahmed H. Zewail) ([Нобелевская премия по химии 1999](#))

*J. Phys. Chem. A*, **104**, 5660 (2000)

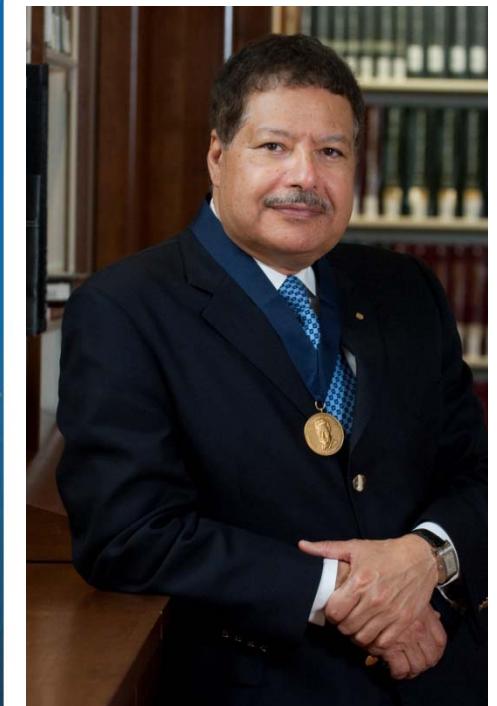
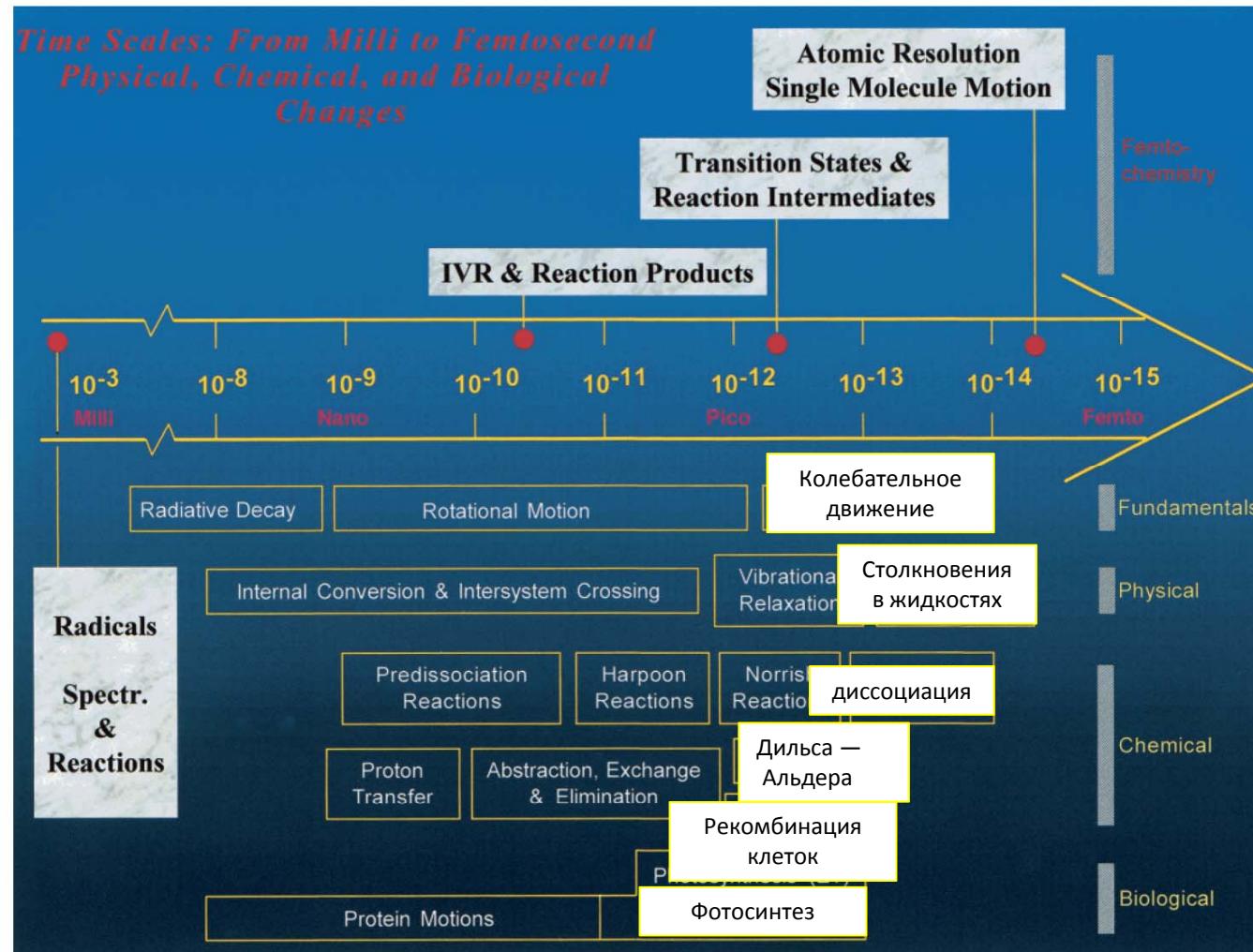


# Фемтохимия

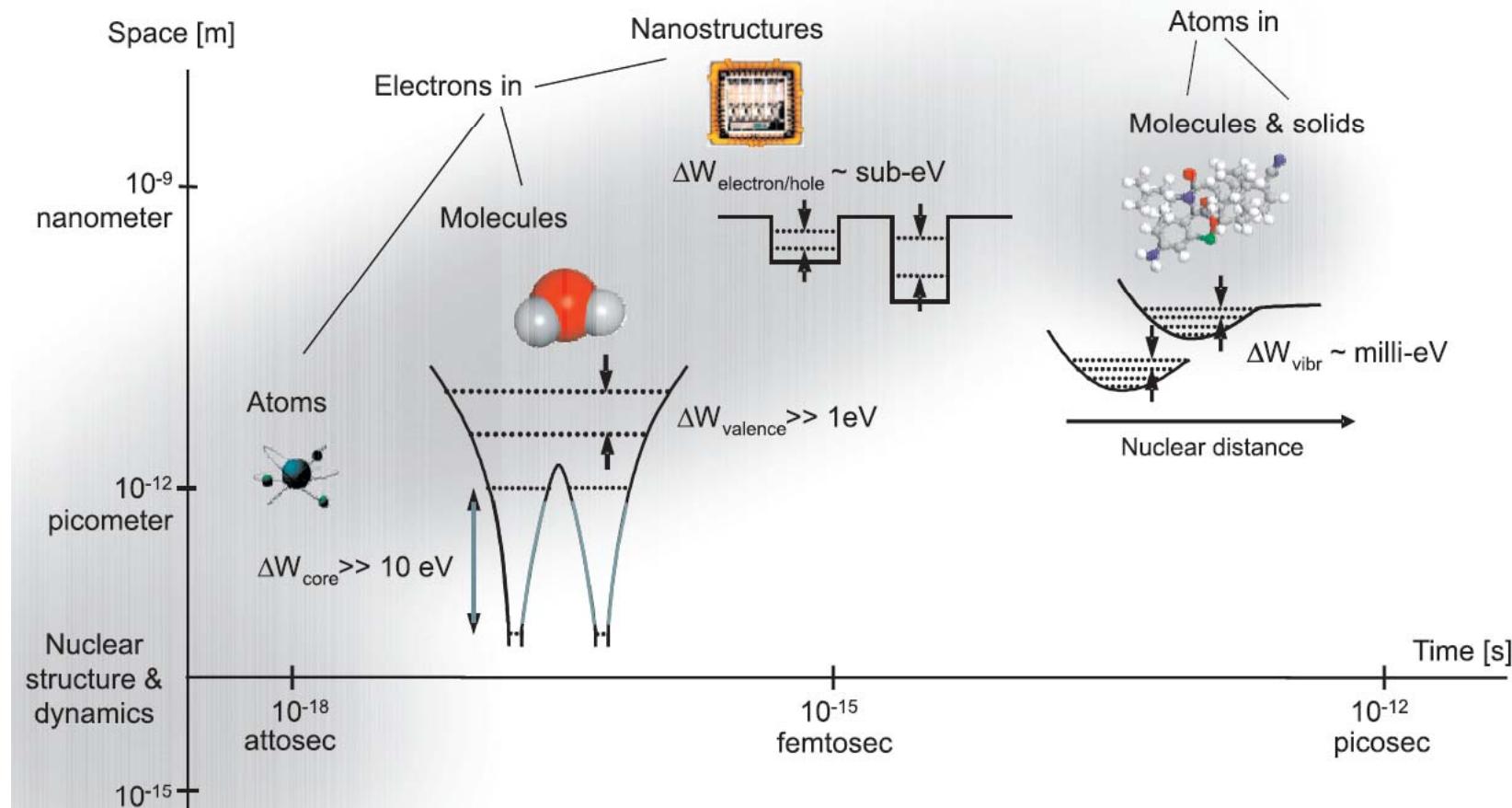
Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond<sup>†</sup>

Ахмед Зевайл (Ahmed H. Zewail) ([Нобелевская премия по химии 1999](#))

*J. Phys. Chem. A*, **104**, 5660 (2000)



# Шкала времен для быстрых процессов



Атомная физика: исследование скорости фотоэмиссии и электронных корреляций.

Молекулярная физика и молекулярная химия: исследование влияния электронного движения (трансфер заряда), фотофрагментация.

Физика твёрдого тела: исследование динамики экситонов в 2D-материалах, перенос носителей заряда в твёрдых телах, спиновая динамика.

# Шкала длин электромагнитных волн



100 км      1мм  
радио       $10^{-11}$ с



# Шкала длин электромагнитных волн



# Шкала длин электромагнитных волн



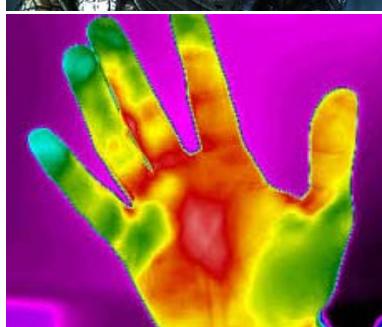
100 км      1мм      1мкм      760нм  
радио       $10^{-11}$ с       $10^{-14}$ с  
Микроволновое      Иракрасное



# Шкала длин электромагнитных волн



100 км      1мм      1мкм      760нм      380нм  
радио       $10^{-11}$ с       $10^{-14}$ с      Инфракрасное      Видимое  
Микроволновое



# Шкала длин электромагнитных волн

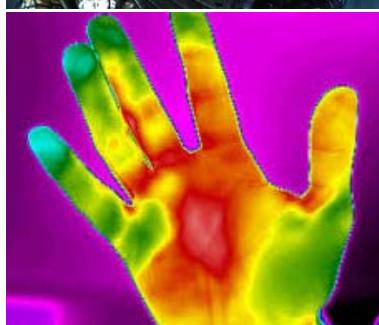
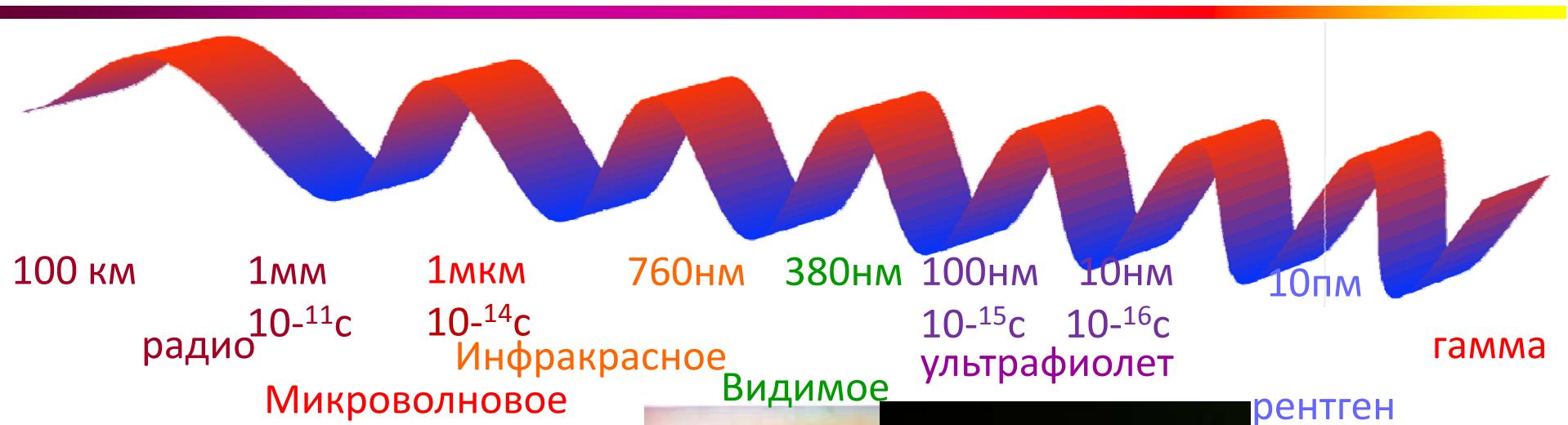


100 км      1мм      1мкм      760нм      380нм      100нм      10нм  
радио      Микроволновое      Инфракрасное      Видимое      Ультрафиолет

$10^{-11}$ с       $10^{-14}$ с       $10^{-15}$ с       $10^{-16}$ с

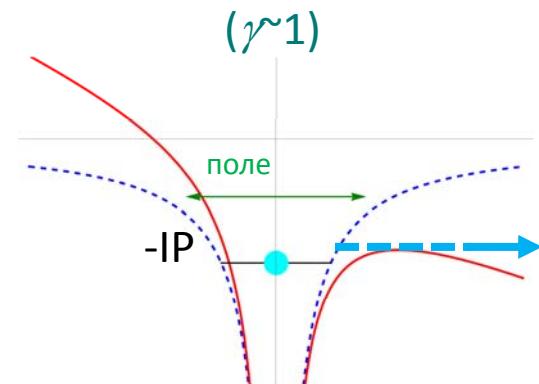


# Шкала длин электромагнитных волн



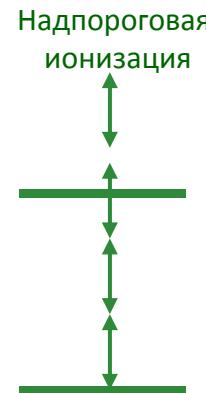
# Взаимодействие оптического и ВУФ излучения с атомами

Туннельная ионизация



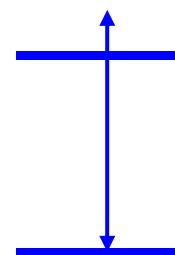
$\omega=0$

Туннельная  
ионизация



$\omega \sim 1 \text{ eV}$

Многофотонная  
ионизация слабо  
связанных  
оболочек



$\omega = 3.9 \text{ eV}$

Однофотонная  
ионизация  
 $\text{Cs}, \text{K}, \text{Na}, \text{Rb}$

**Фотоэффект**

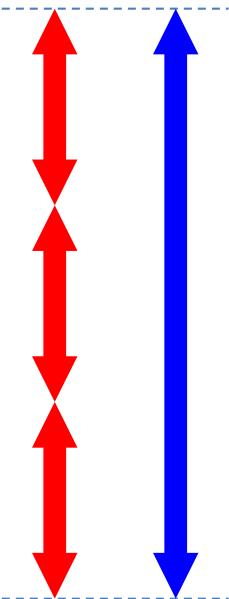
$$\gamma = \frac{\omega \sqrt{2I_p}}{E}$$

Ионизация  $\text{A} + \gamma \rightarrow \text{A}^+ + \text{e}^-$

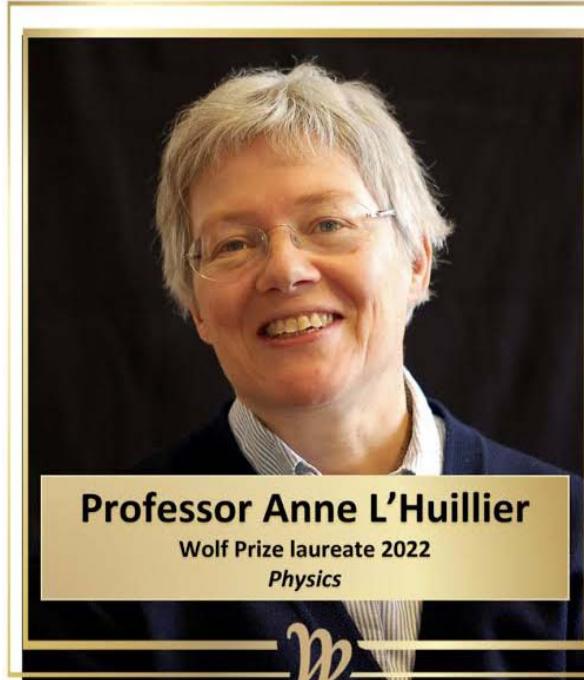
$\omega \sim 40 \text{ eV}$

Ионизация суб-  
валентных оболочек

# Генерация частот (ННГ)

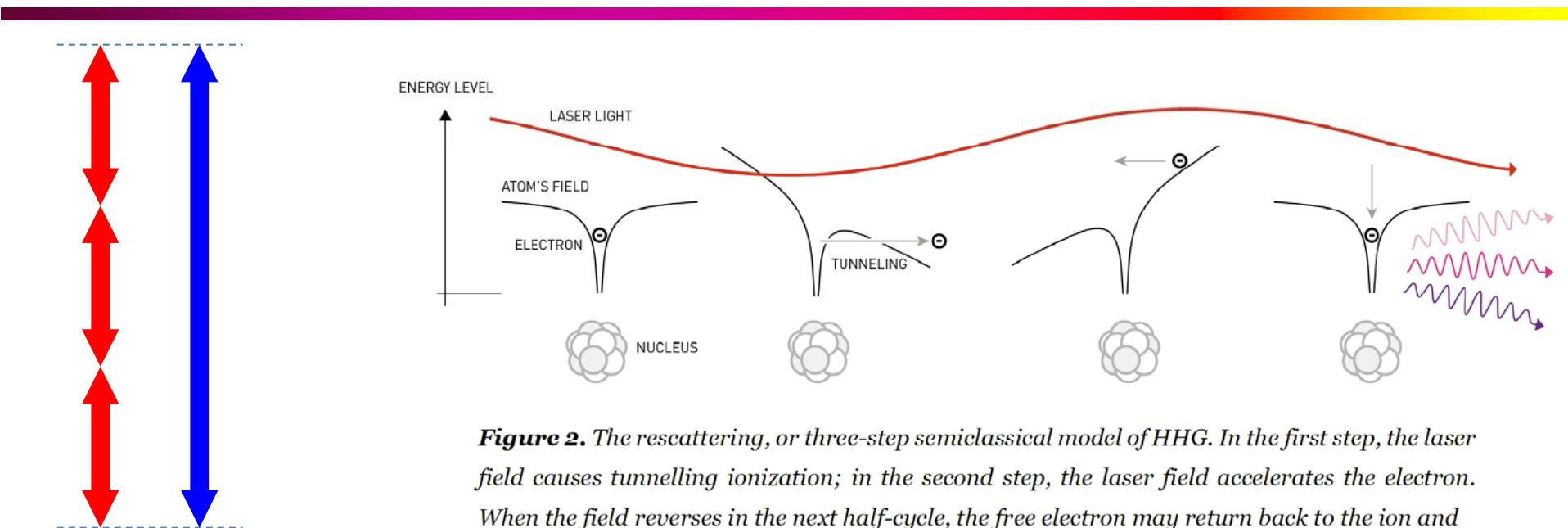


Сложение гармоник



В 1987 Анн Л'Юилье (**Anne L'Huillier**) открыла, что при прохождении лазерного излучения через инертный газ возникает множество кратных частот.

# Генерация частот (HHG)

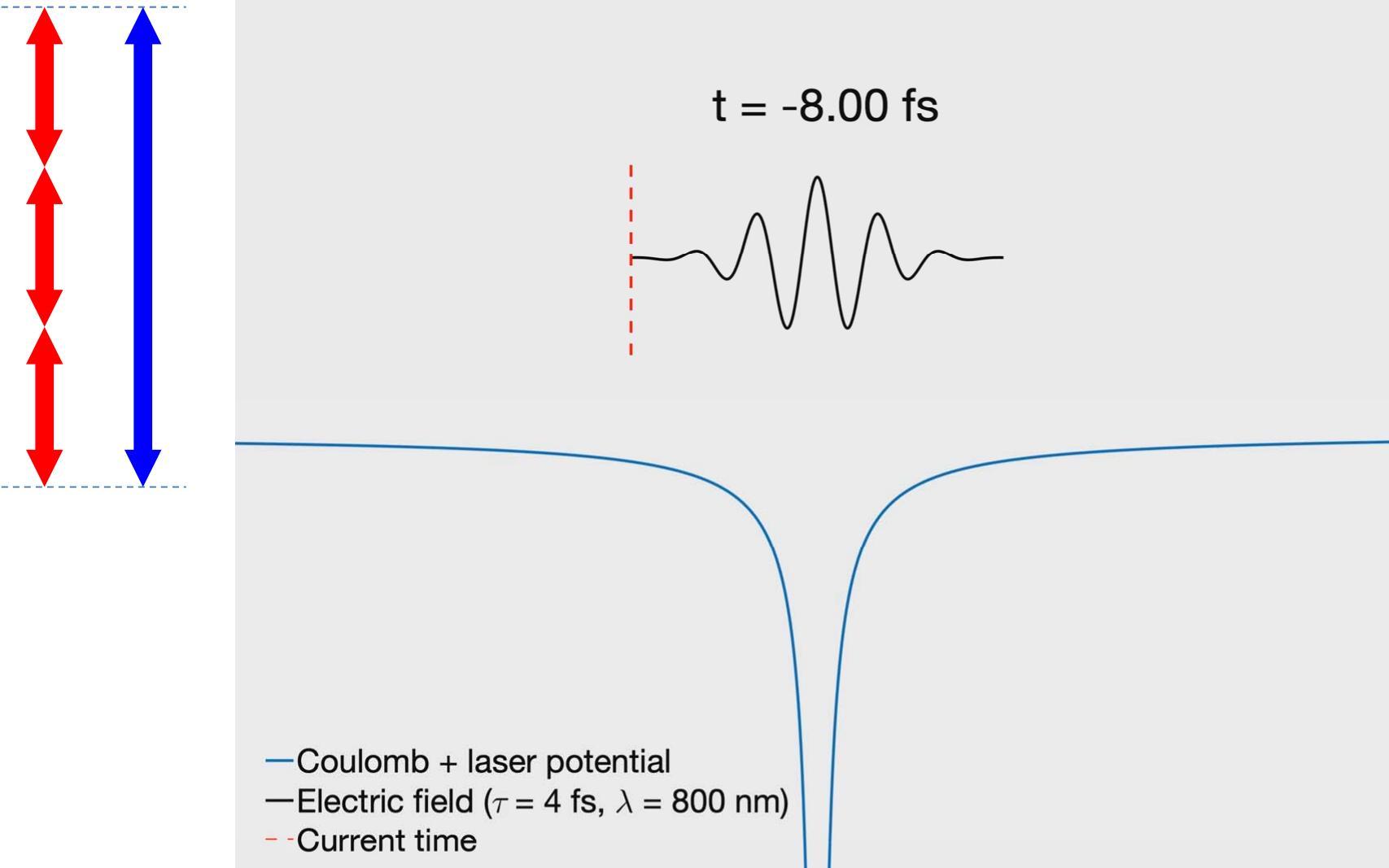


**Figure 2.** The rescattering, or three-step semiclassical model of HHG. In the first step, the laser field causes tunnelling ionization; in the second step, the laser field accelerates the electron. When the field reverses in the next half-cycle, the free electron may return back to the ion and

В 1987 Анн Л'Юилье (**Anne L'Huillier**) открыла, что при прохождении лазерного излучения через инертный газ возникает множество кратных частот.

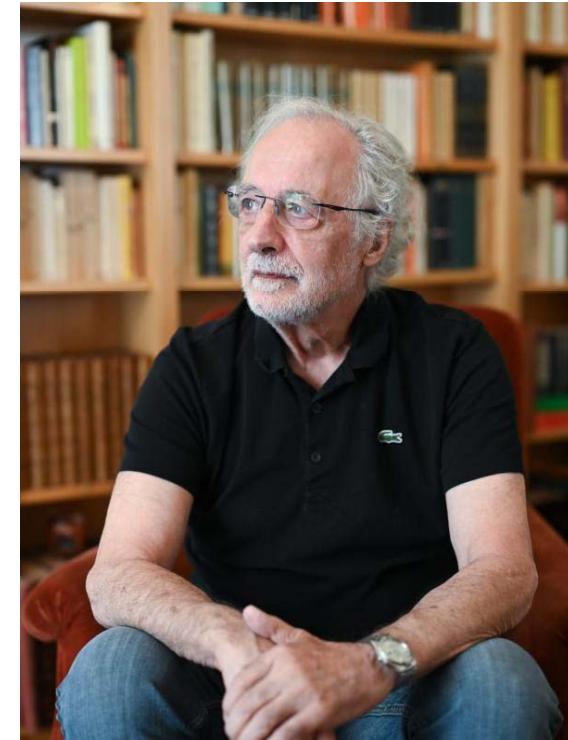
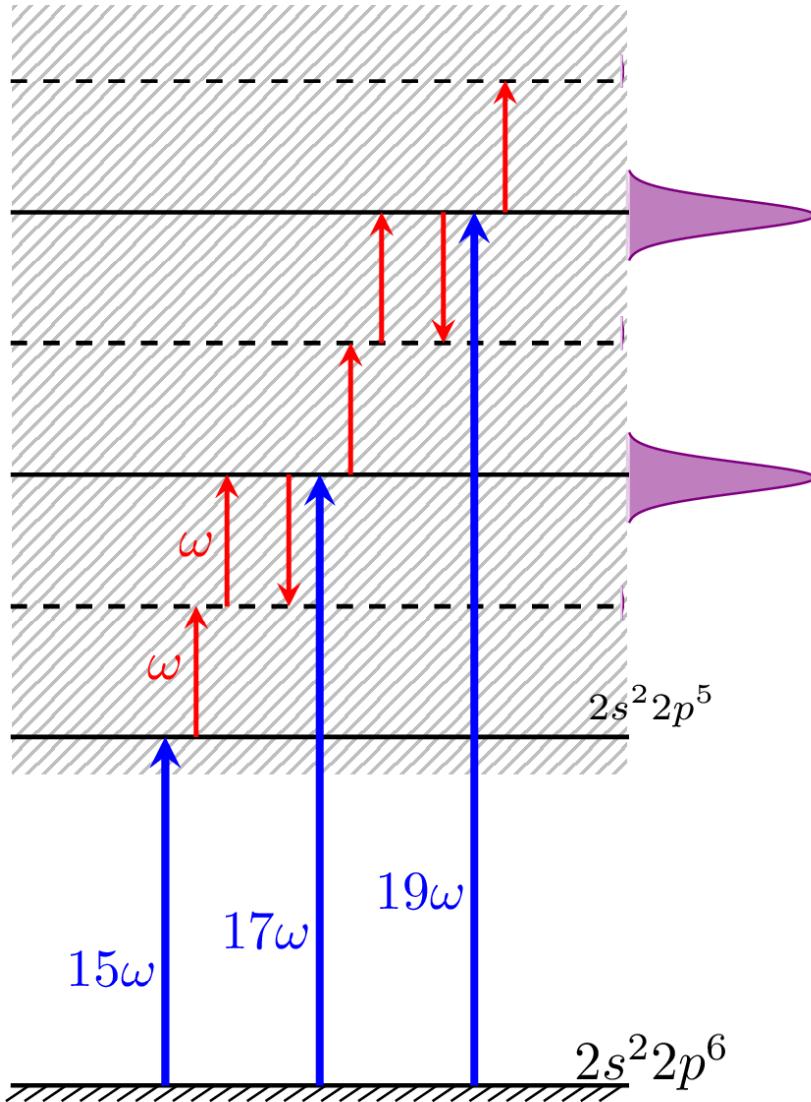
Объяснение механизма  
P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).

# Генерация частот (ННГ)



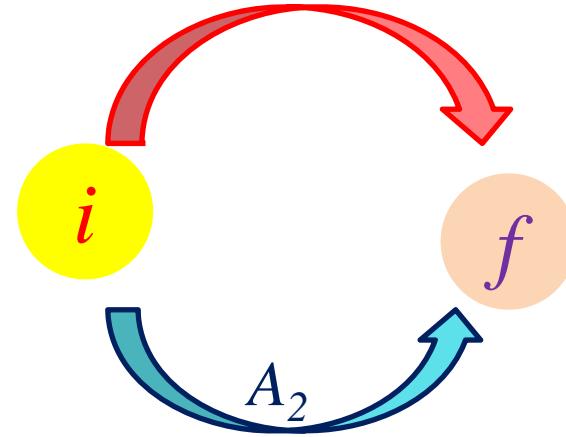
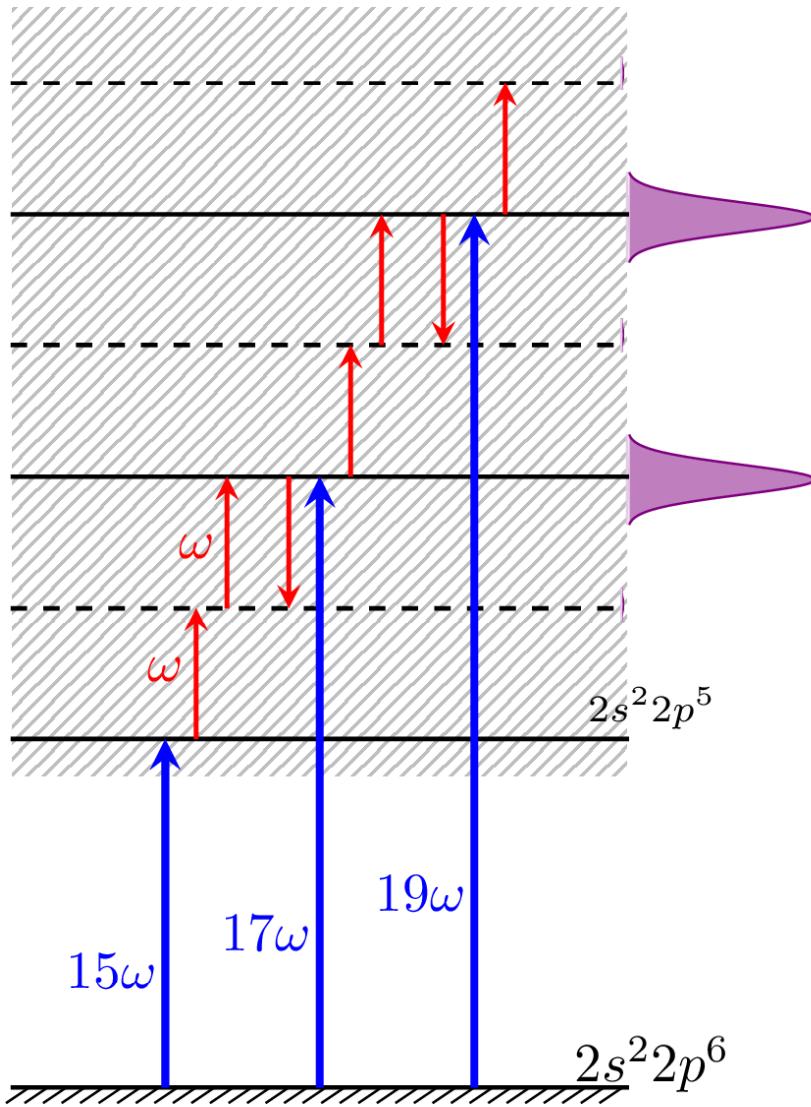
В 1987 Анн Л'Юилье (**Anne L'Huillier**) открыла, что при прохождении лазерного излучения через инертный газ возникает множество кратных частот.

# RABBITT спектроскопия



В 1994 Пьер Агостини (Pierre Agostini ) предложил метод, позволяющий характеризовать импульсы электромагнитного изучения с аттосекундной точностью.  
**RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.**

# RABBITT спектроскопия

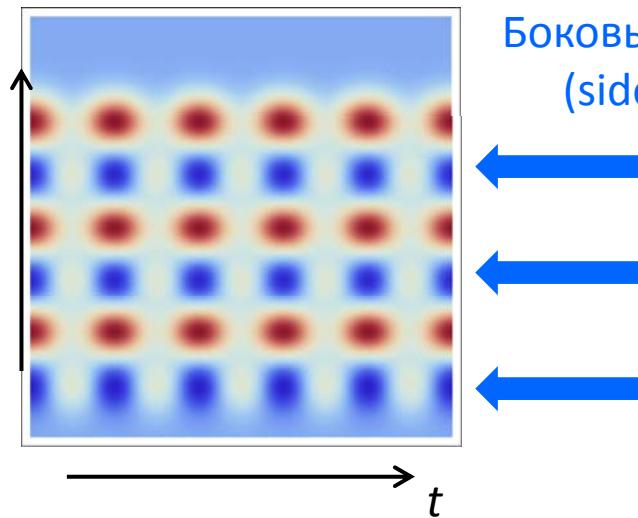
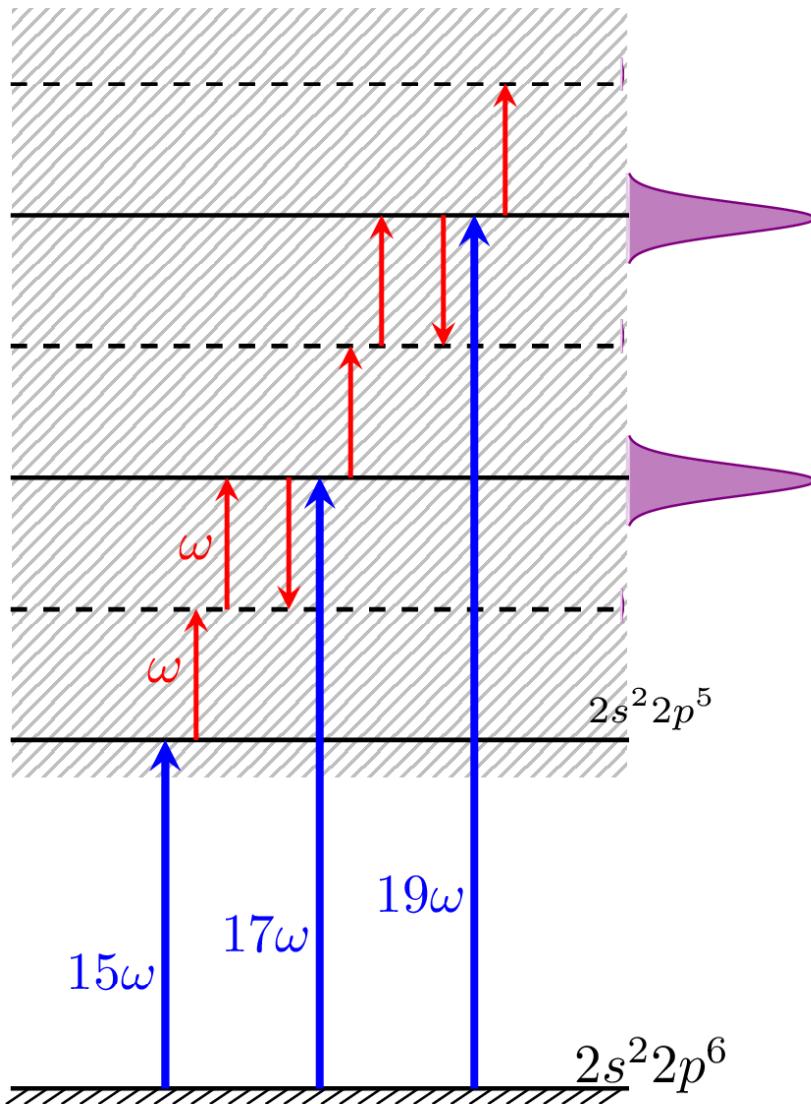


$$|A_1 e^{i\phi} + A_2 e^{-i\phi}|^2$$

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

В 1994 Пьер Агостины (Pierre Agostini) предложил метод, позволяющий характеризовать импульсы электромагнитного излучения с аттосекундной точностью.  
RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

# RABBITT спектроскопия



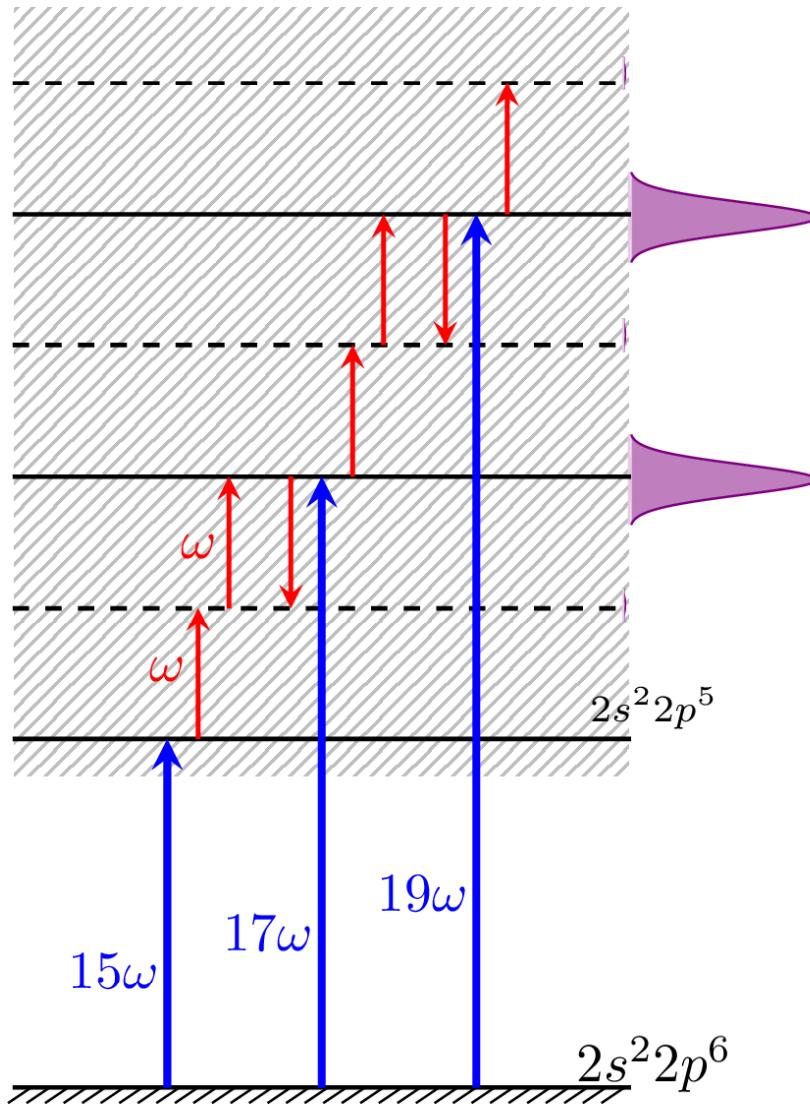
Боковые частоты  
(sidebands)

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

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.

# RABBITT спектроскопия

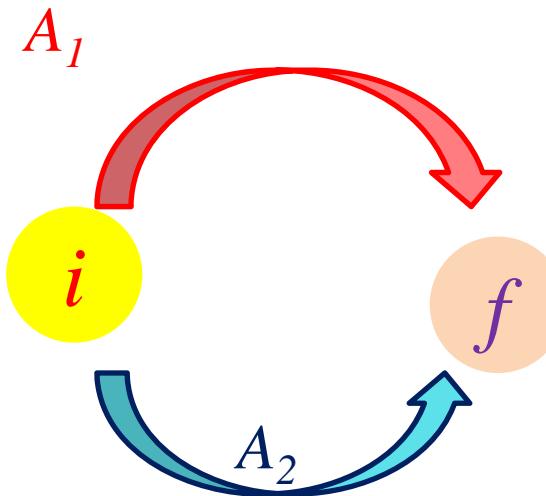
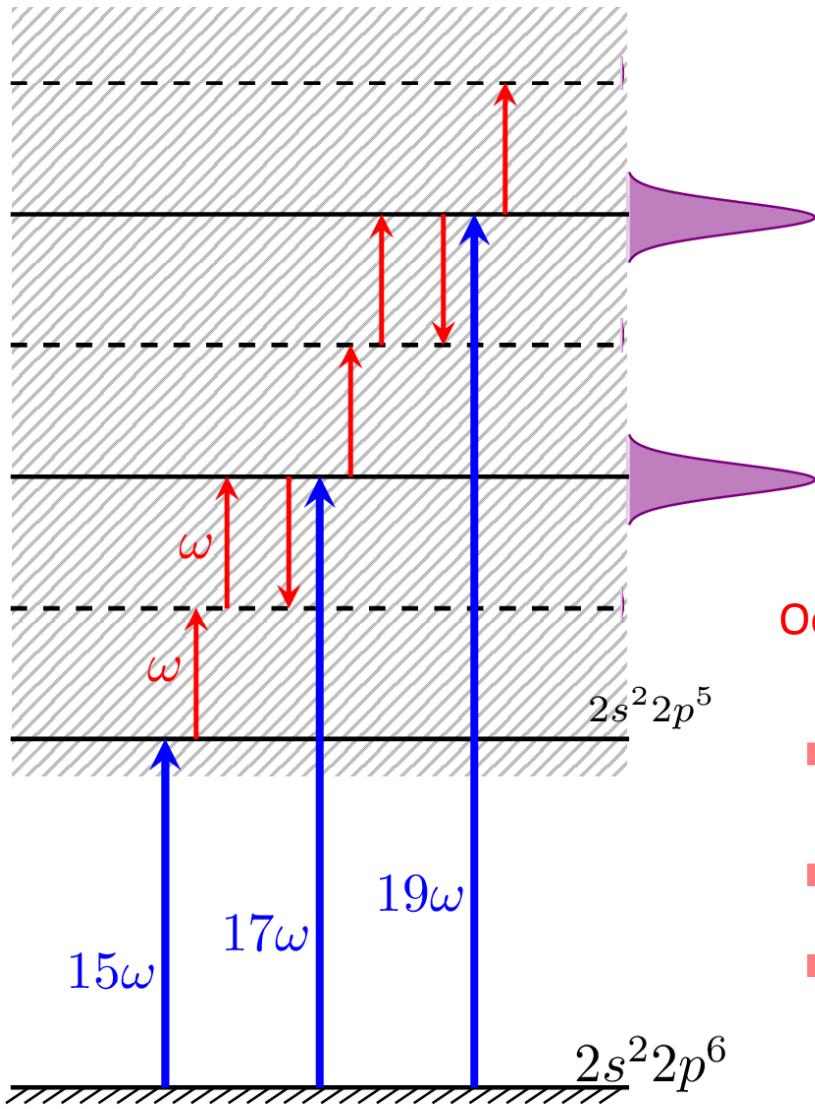


$$\alpha + \beta \cos(2\omega t)$$

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



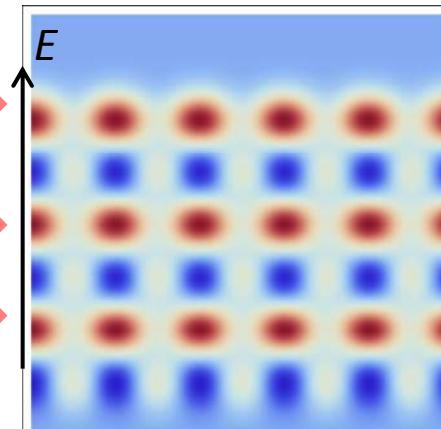
$$|A_1 e^{i\phi} + A_2 e^{-i\phi}|^2$$

Основные

линии

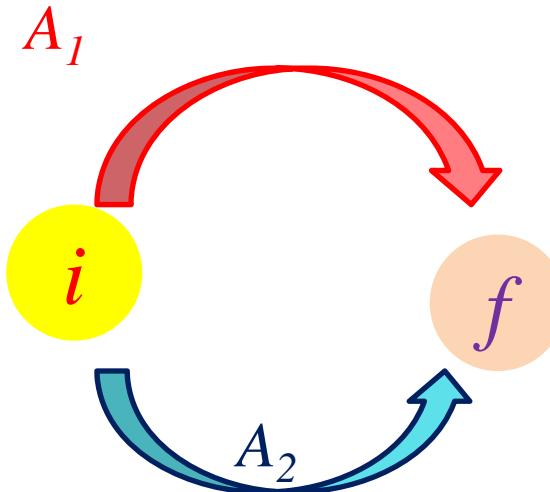
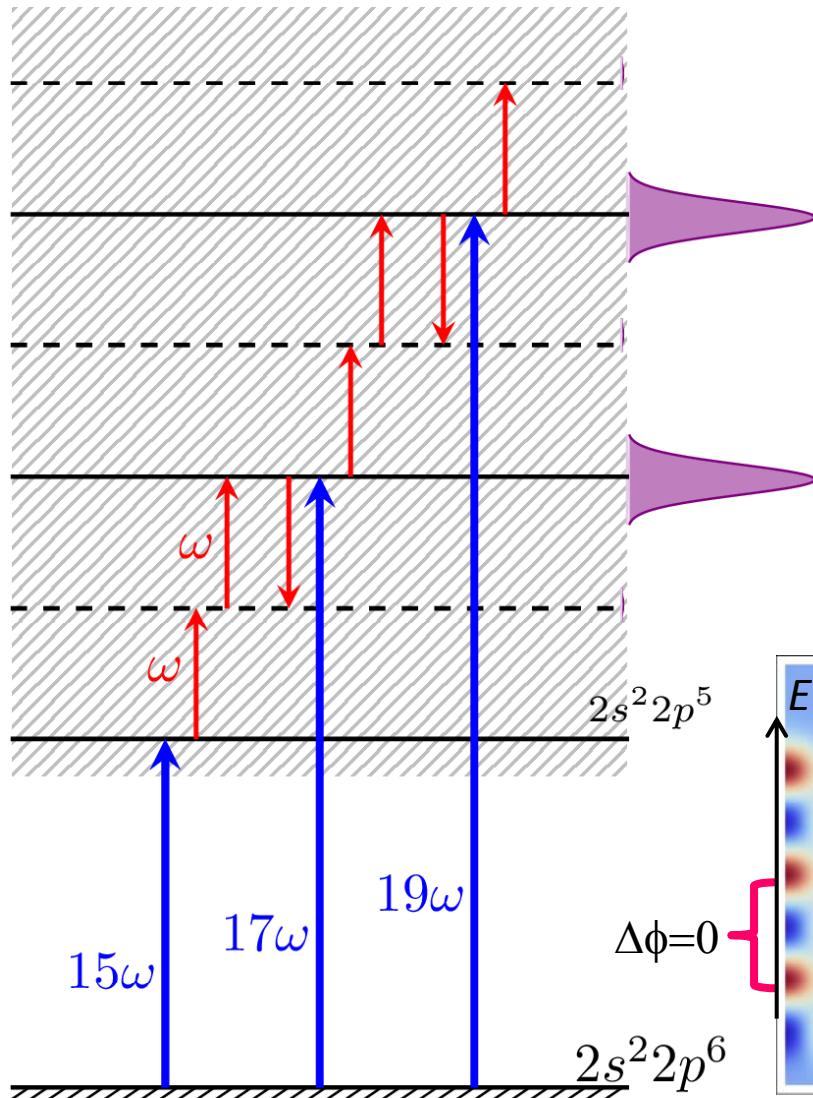
Боковые частоты

(sidebands)

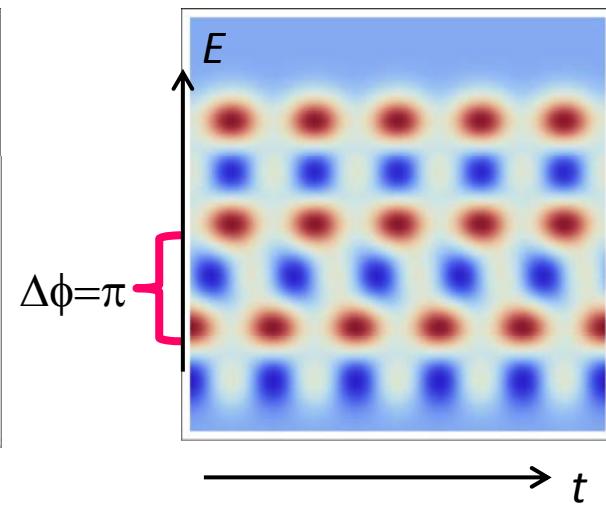
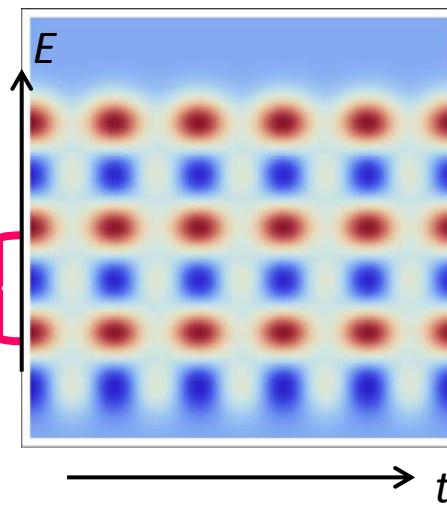


$\rightarrow t$

# Определение фазы гармоники



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



# Самый короткий импульс

---



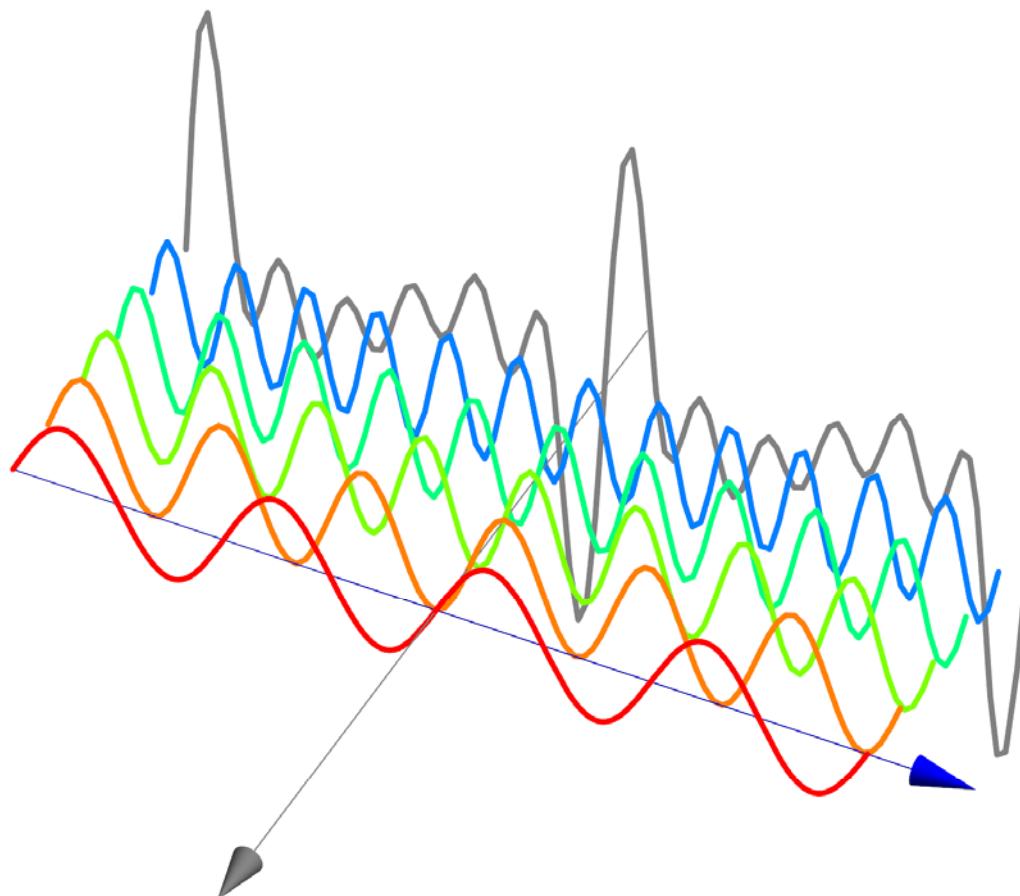
**express** Foto: Österreichische Akademie der Wissenschaften



В 2001 Пьер Агостиани (Pierre Agostini) получил цепочку импульсов длительностью 250 аттосекунд (attosecond train), в том же год у Ференц Краус (Ferenc Krausz) получил одиночный импульс длительностью 650 аттосекунд.

## Создание последовательности коротких импульсов

---

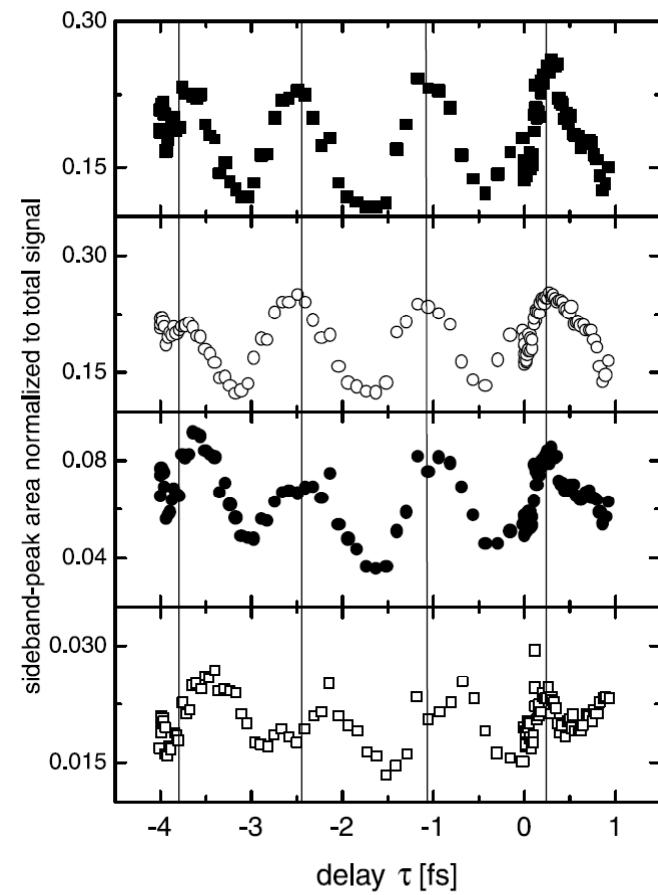
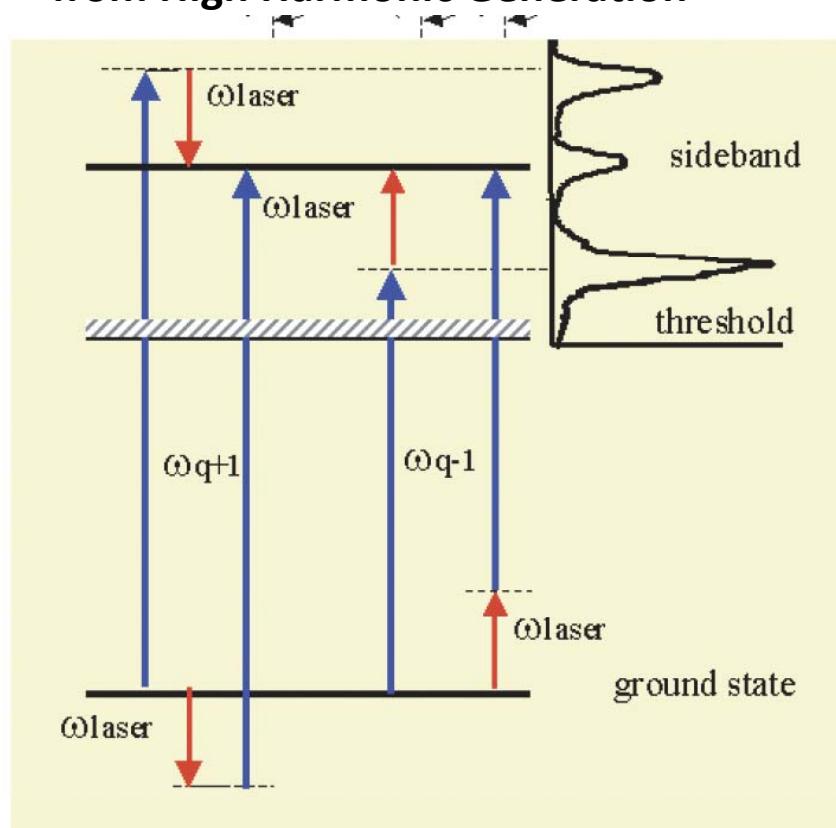


# Создание последовательности коротких импульсов

R. M. Paul....., AND P. Agostini

*Science 292, 1689 (2001);*

**Observation of a Train of Attosecond Pulses  
from High Harmonic Generation**

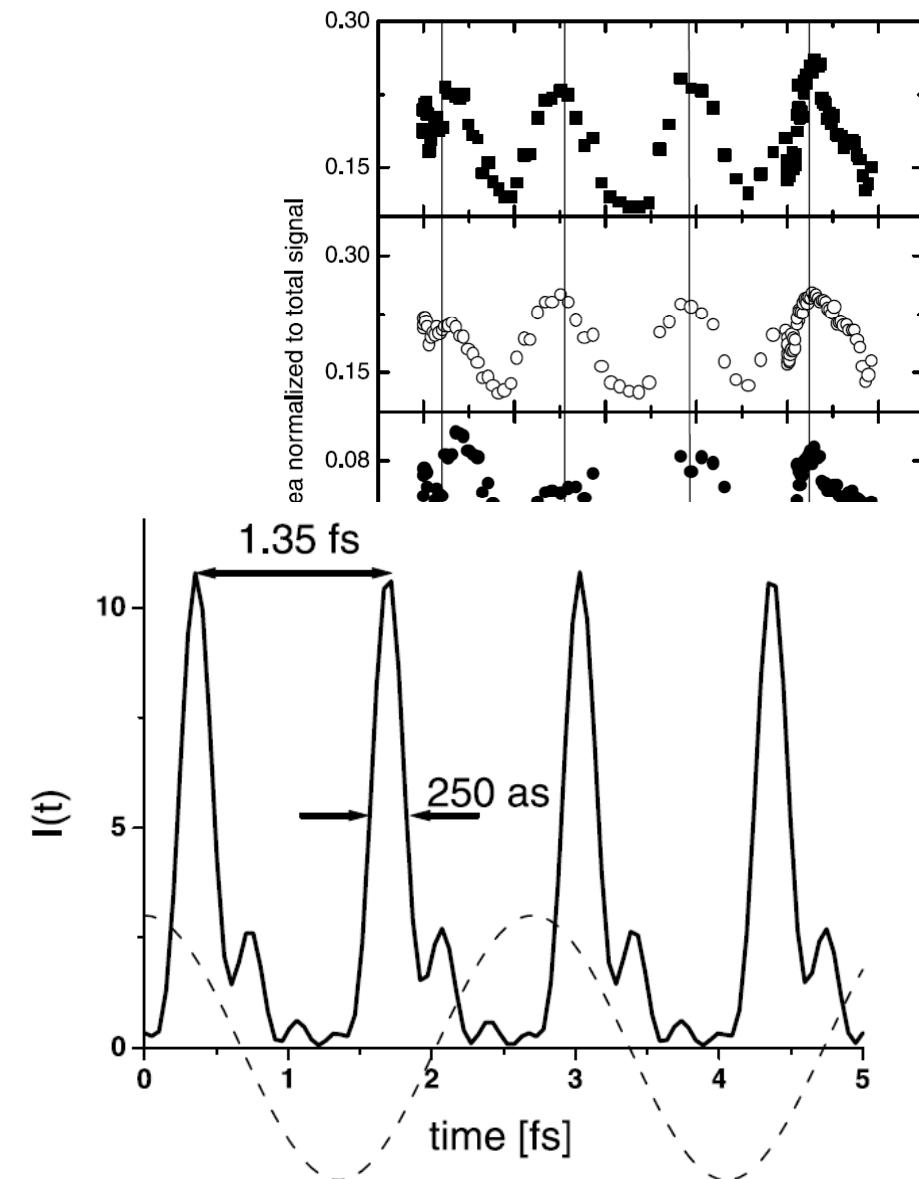
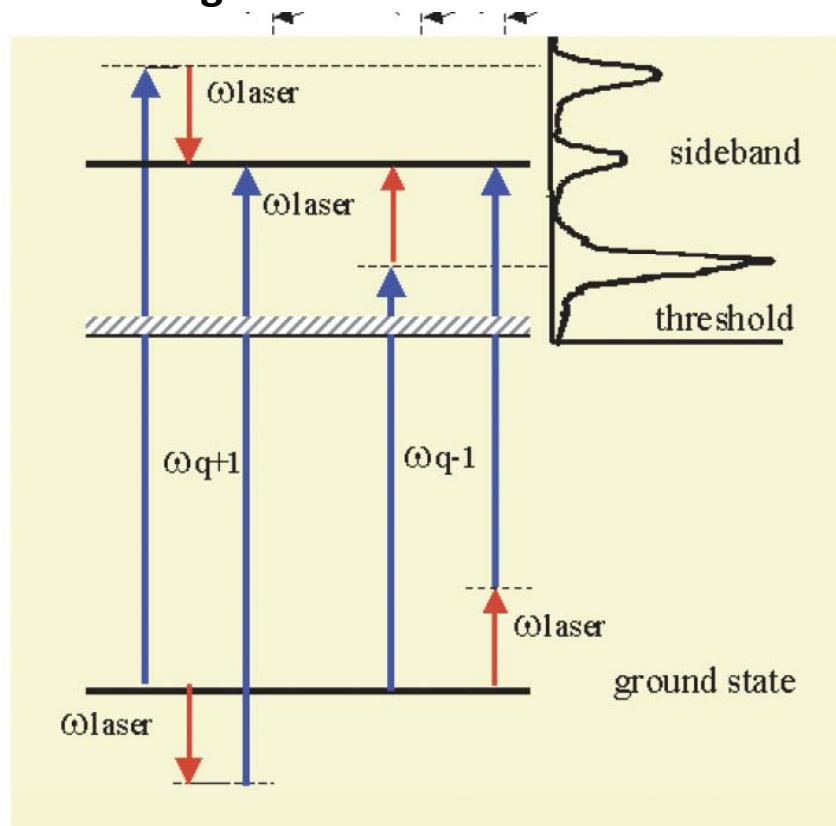


# Создание последовательности коротких импульсов

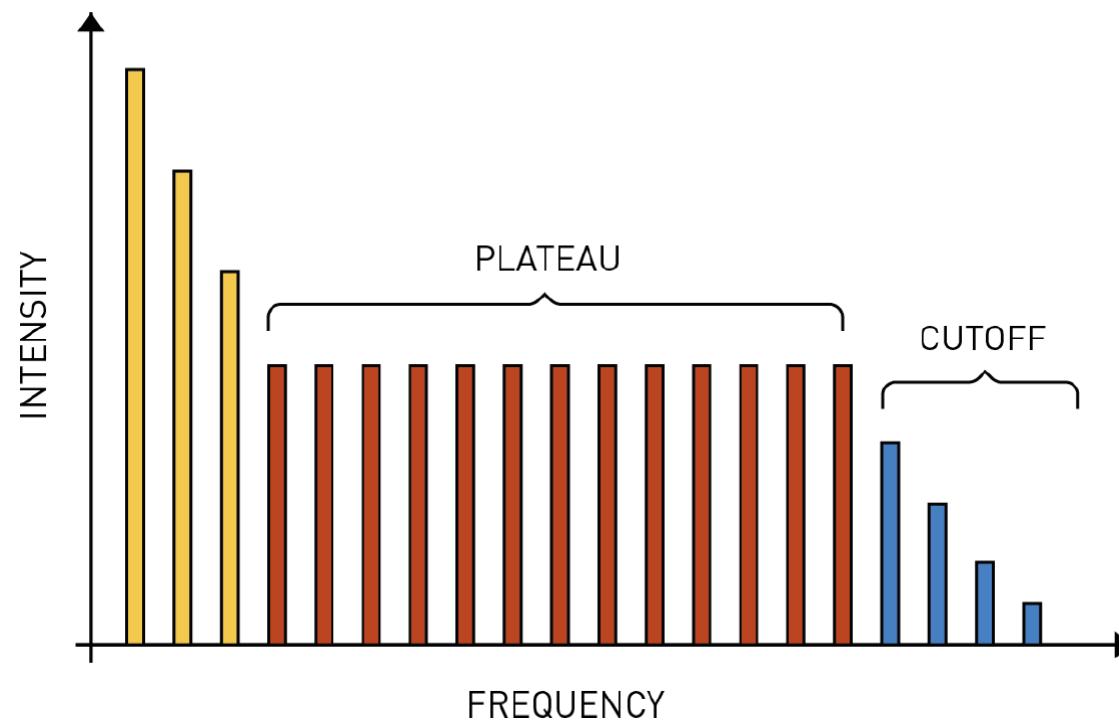
R. M. Paul....., AND P. Agostini

*Science 292, 1689 (2001);*

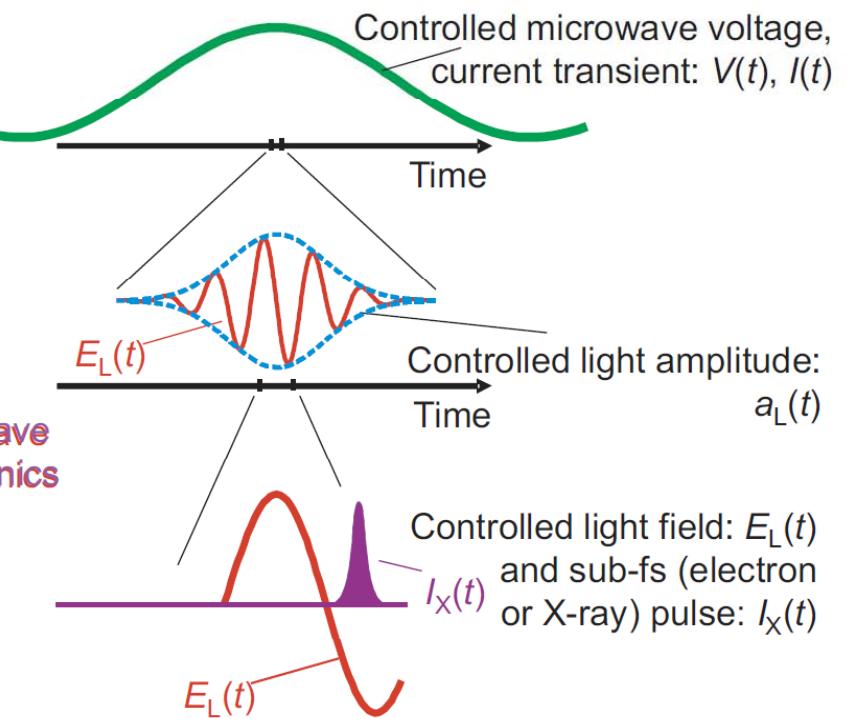
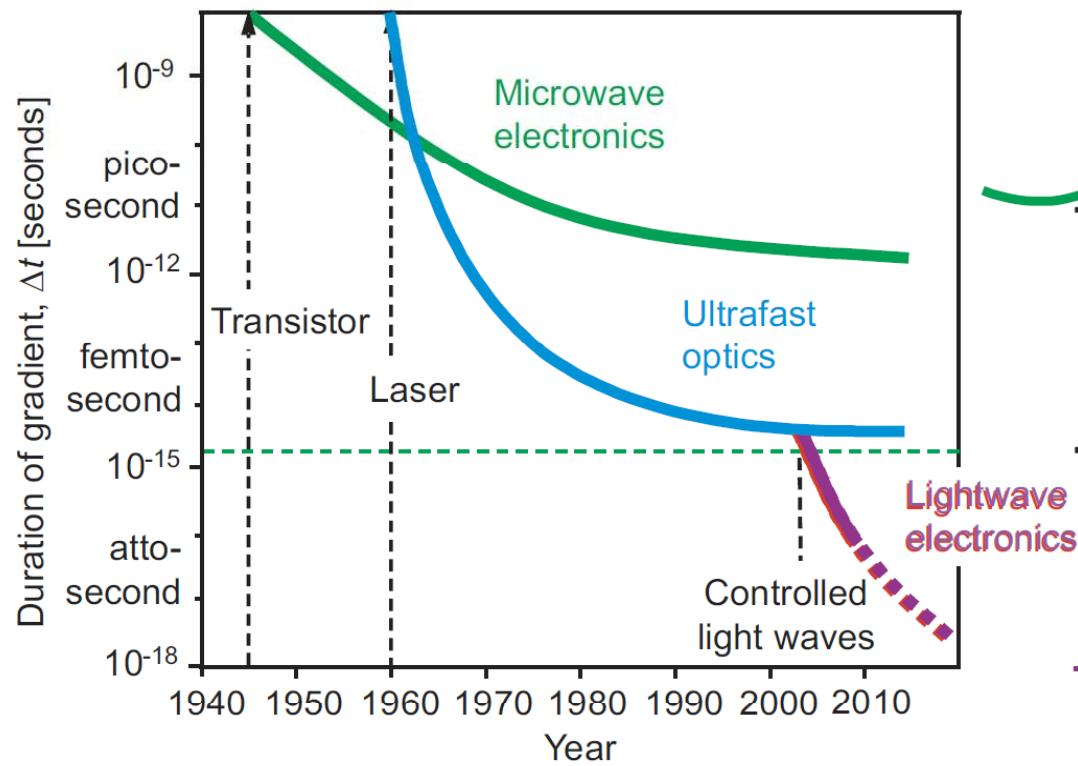
**Observation of a Train of Attosecond Pulses  
from High Harmonic Generation**



# Плато в генерации гармоник

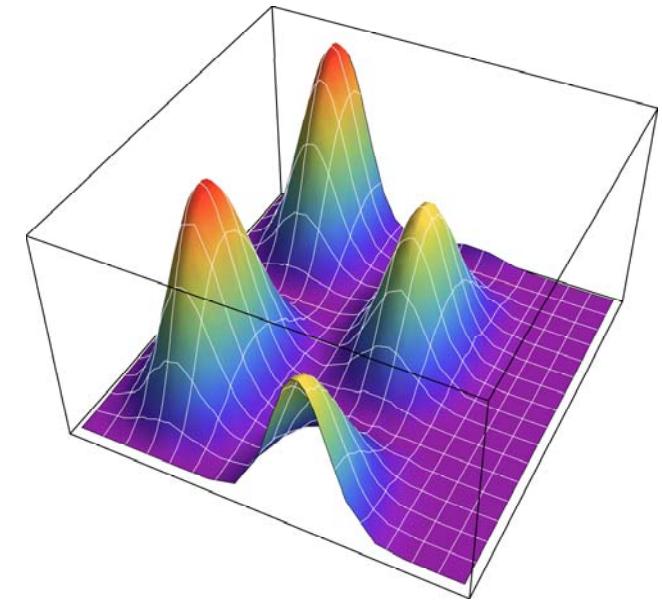
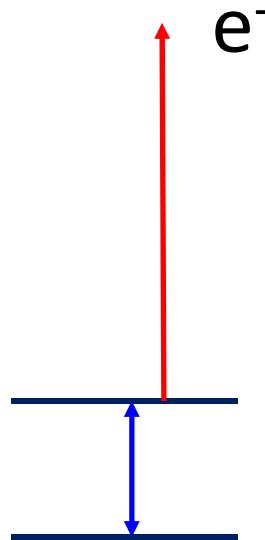
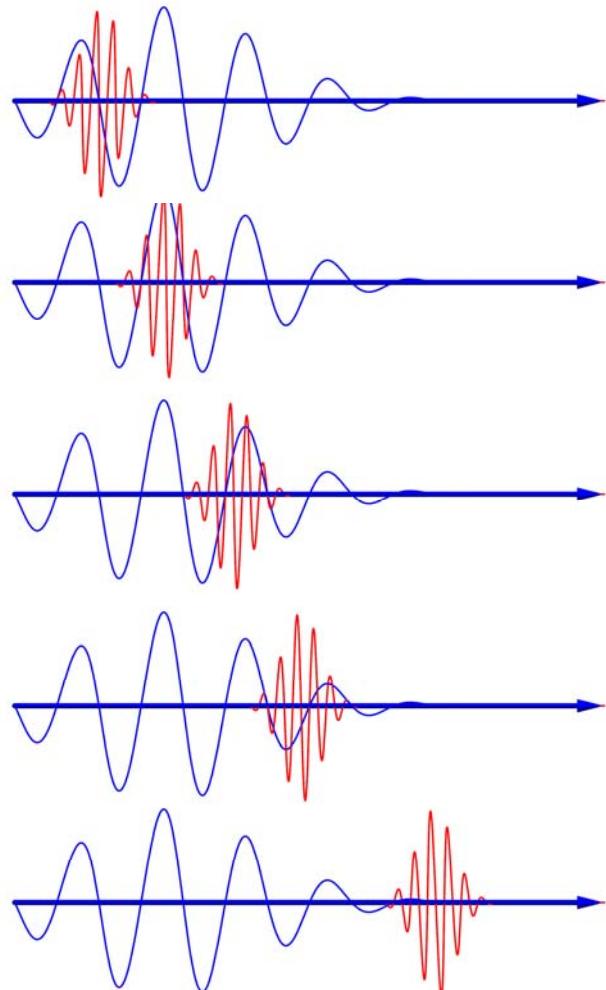


# ЭВОЛЮЦИЯ «ЗАТВОРОВ»



Ferenc Krausz  
**Attosecond physics**  
REVIEWS OF MODERN PHYSICS, 81 163 (2009)

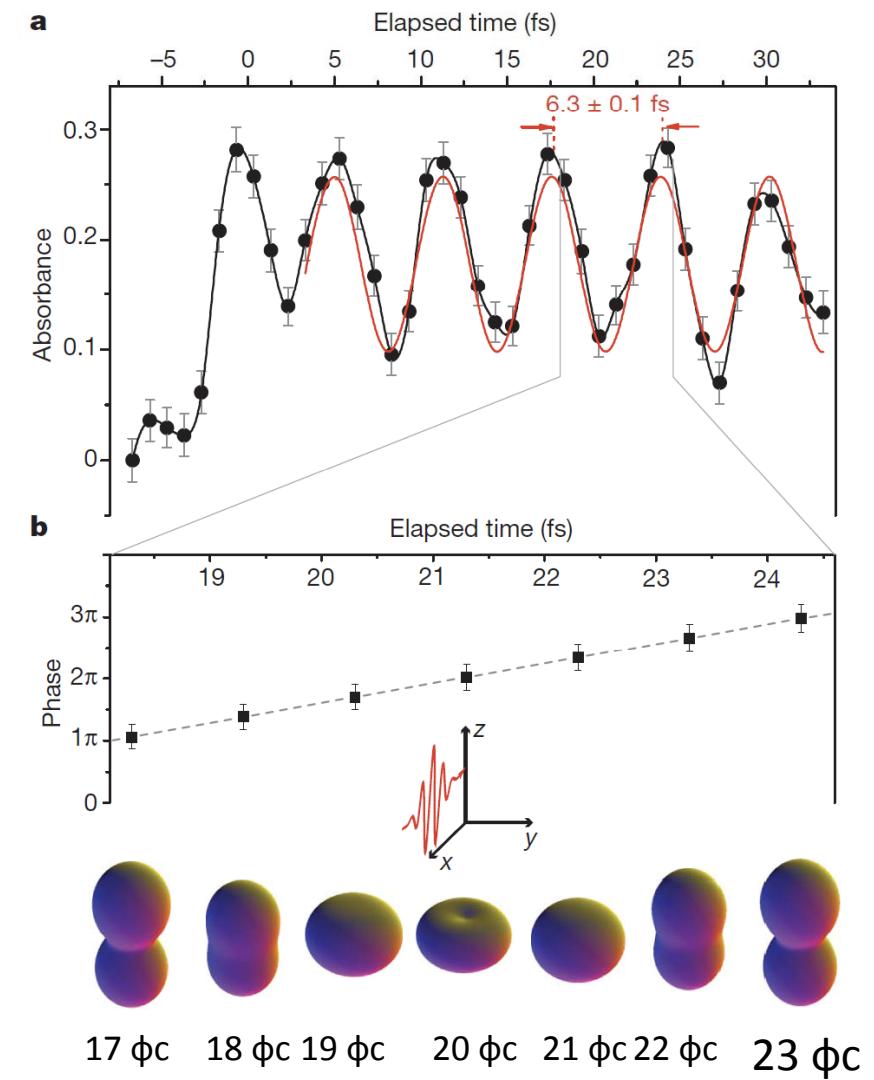
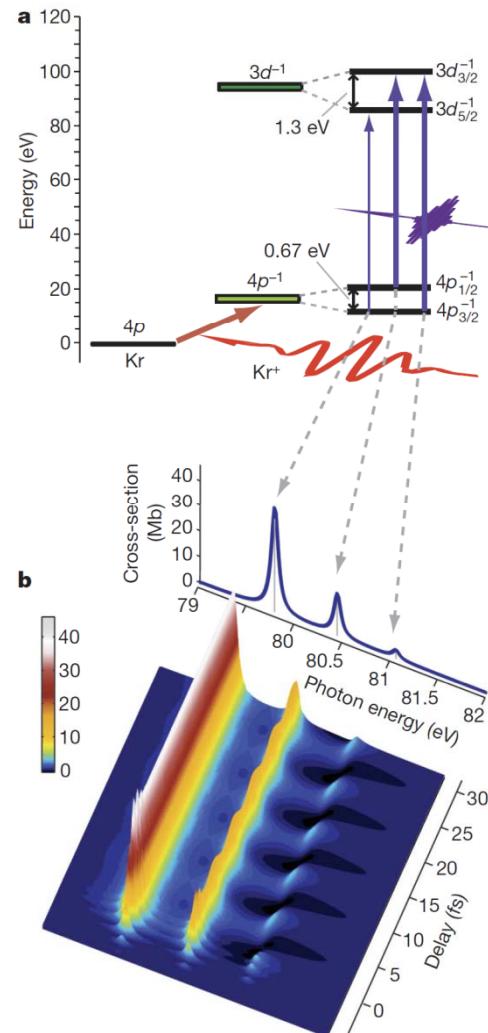
# STREACING спектроскопия



В 2001 Ференц Краус (Ferenc Krausz) использовал метод streacing спектроскопии для решения фундаментальной проблемы квантовой механики – определения времени фотоэффекта

# Наблюдение эволюции электронной плотности

Real-time observation of valence electron motion  
E. Goulielmakis... F. Krausz et al *Nature*, 465, 761



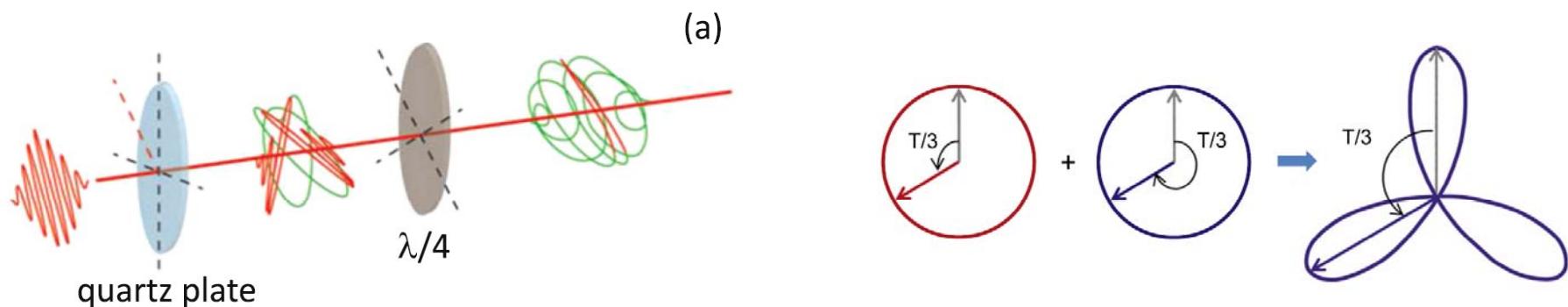
Плотность 4p оболочки как функция времени

# Способы ограничить импульсы во времени

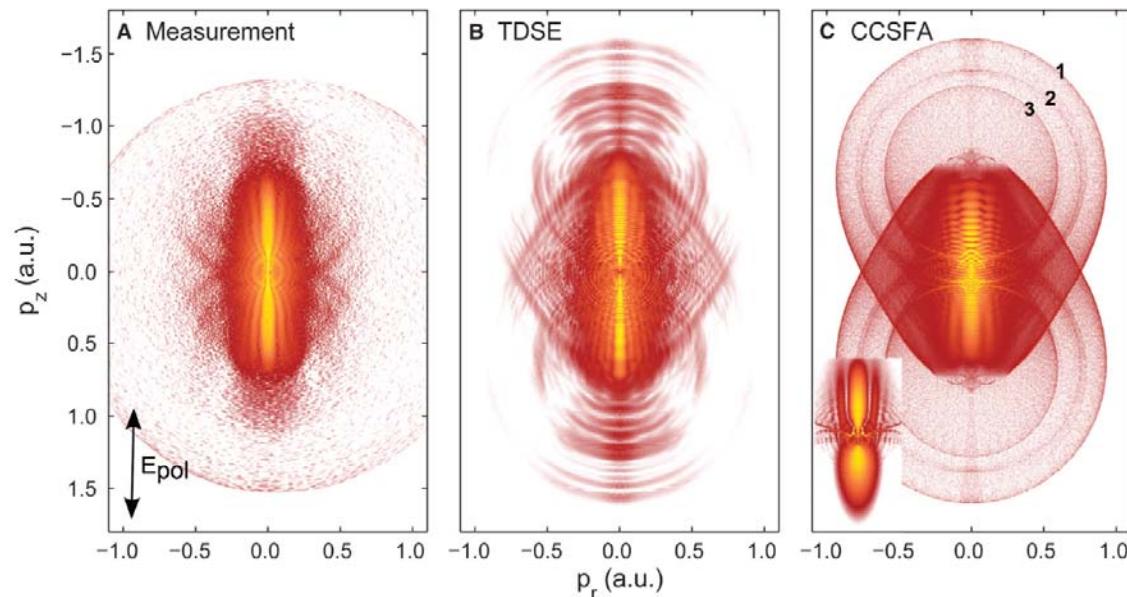
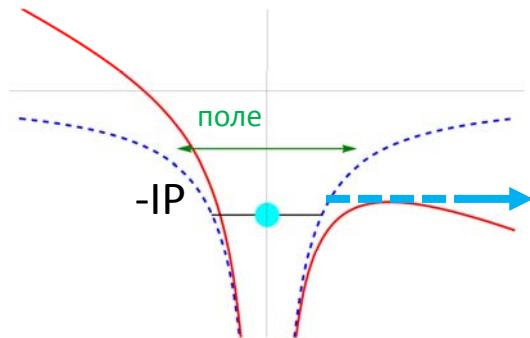
Использовать «одиночный» затравочный импульс

Использовать поля с переменной во времени поляризацией

Модулировать затравочную частоту второй гармоникой

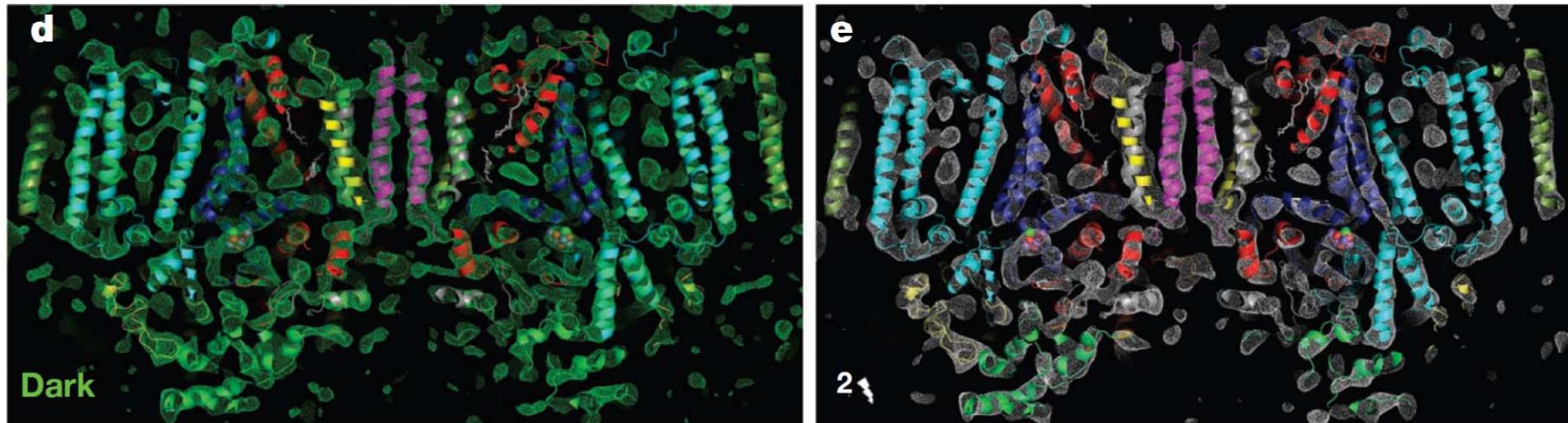


# Фотоэлектронная голограмия



Time-Resolved Holography  
with Photoelectrons  
Y. Huismans et al  
Science **331**, 61 (2011)

# Наблюдение фотосинтеза

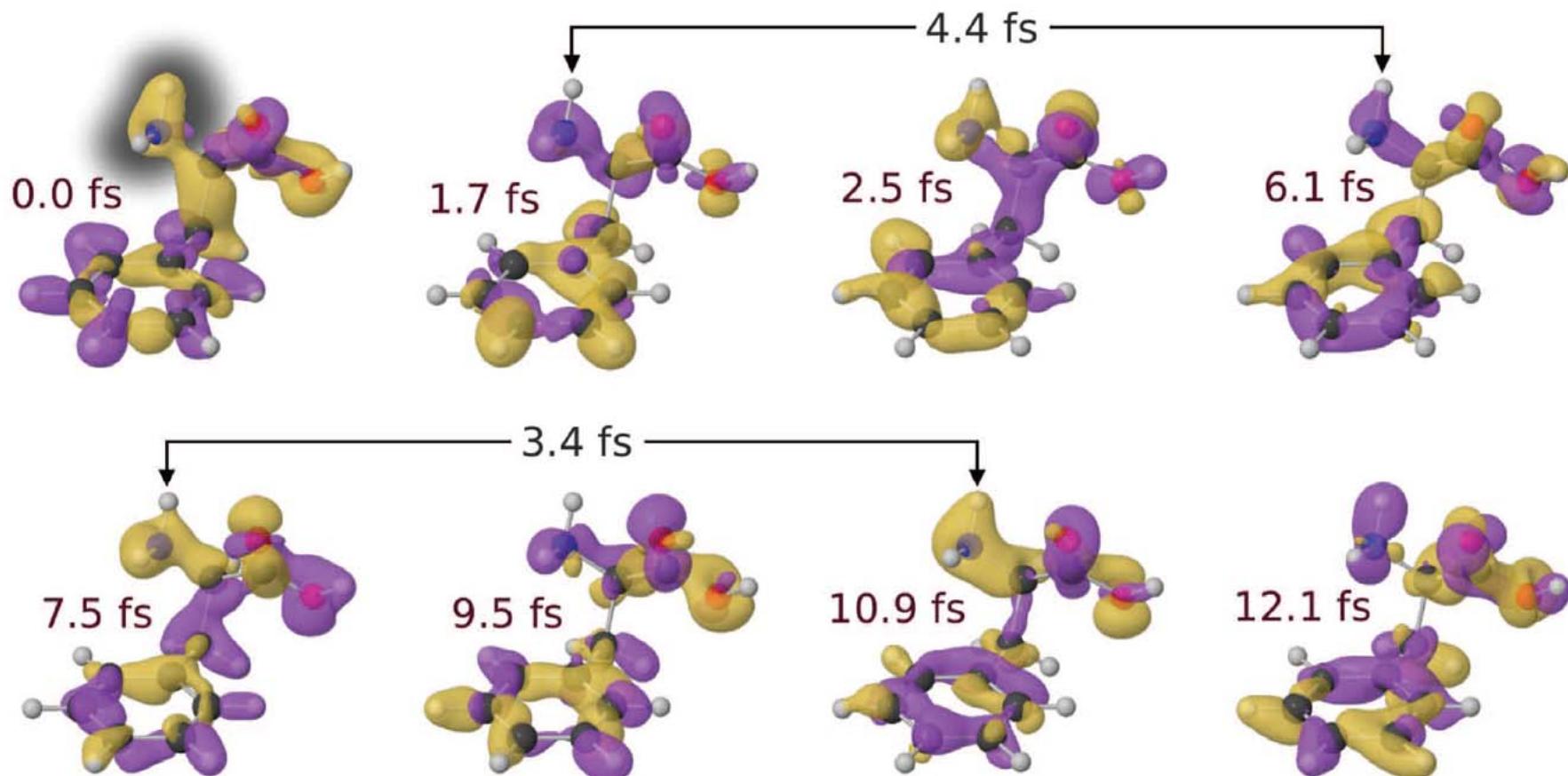


Карта электронной плотности фотосистемы II ( $\text{H}_2\text{O}$ -пластохиноноксидоредуктаза) до и после поглощения двух фотонов

Наблюдение биохимического процесса в режиме реального времени

C. Kupitz et al; Serial time-resolved crystallography of photosystem II using a femtosecond X-ray laser, Nature 513, 261 (2014).

# Трансфер заряда в атомах и молекулах



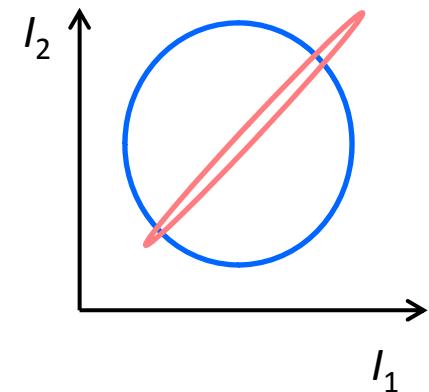
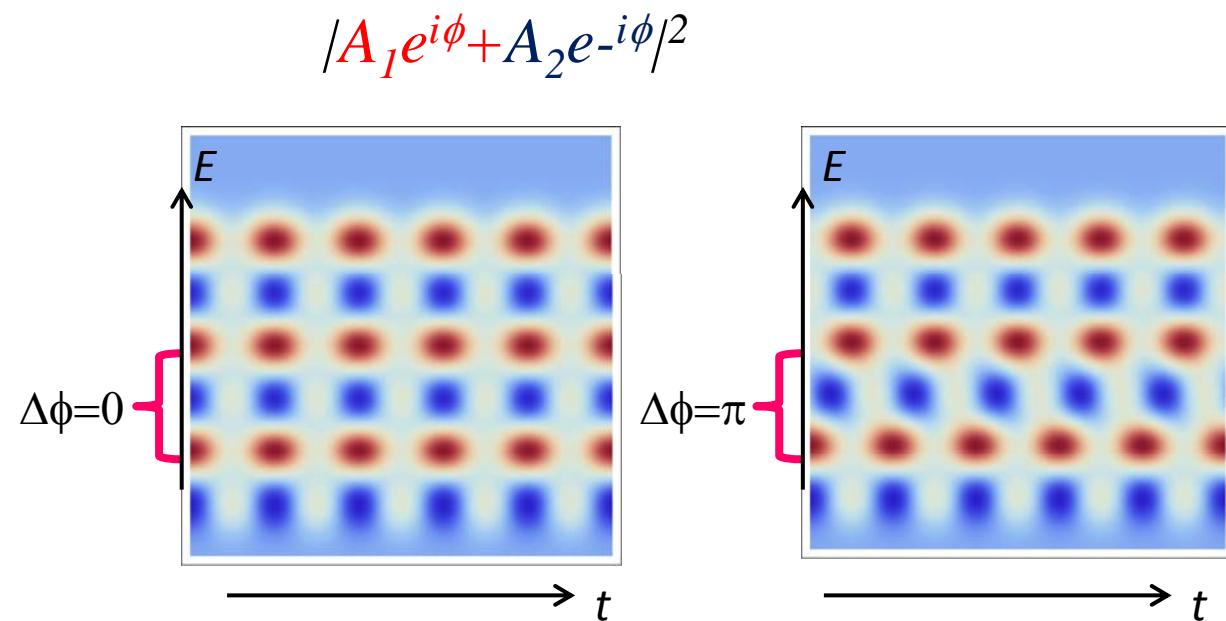
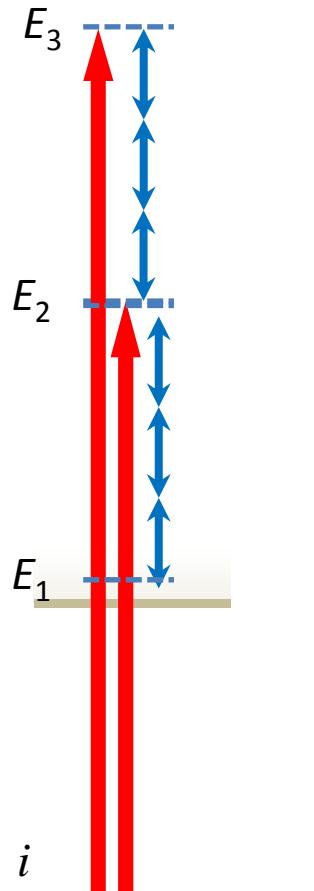
Ultrafast electron dynamics in phenylalanine initiated by attosecond pulses  
F. Calegari et al  
Science **34** 336 (2014)

# Аттосекундная метрология в НИИЯФ МГУ

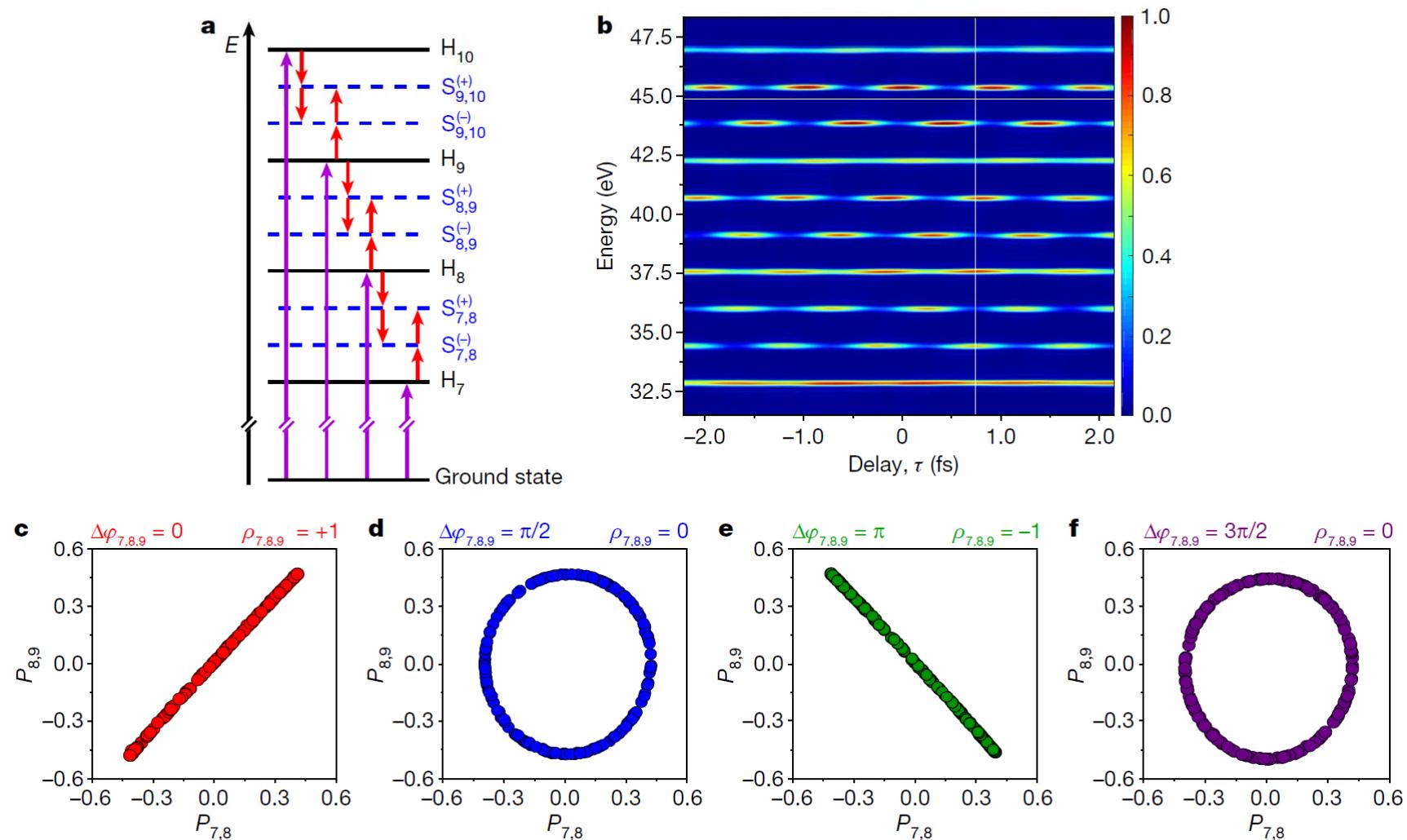
Attosecond pulse shaping using a seeded free-electron laser

Nature, 578, 386 (2020)

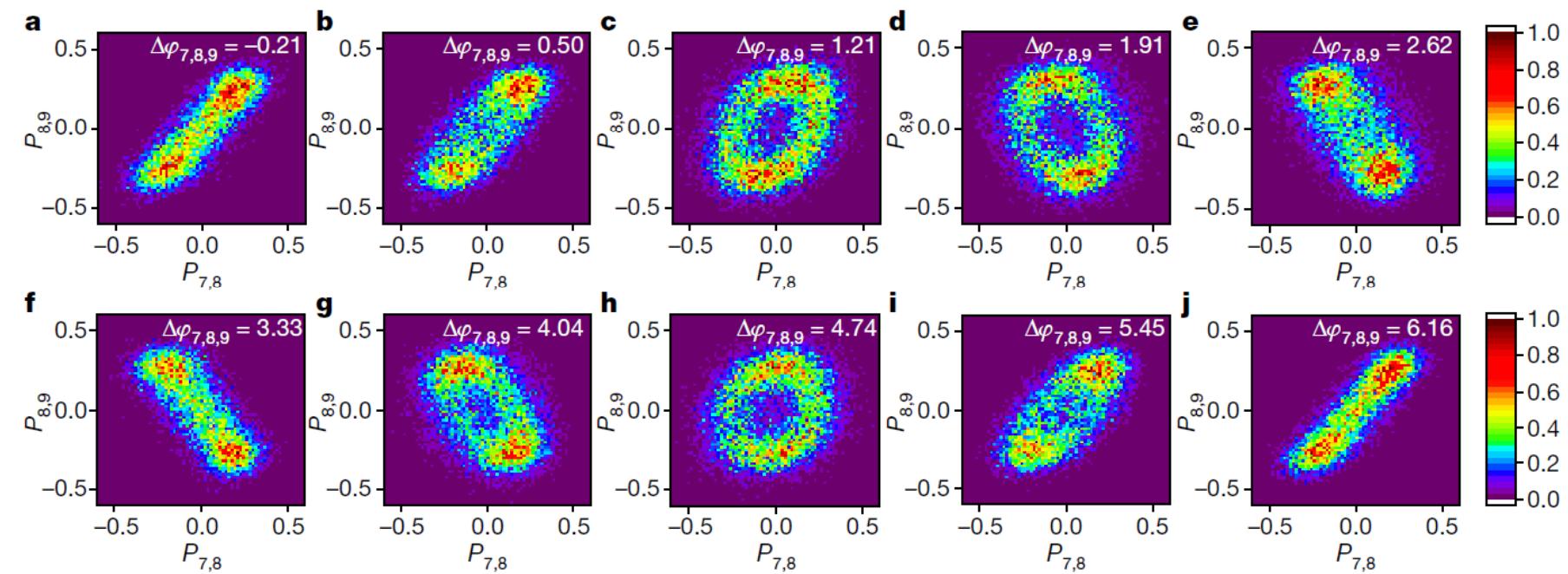
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2005-6>



# Ионизация многочастотным полем ( $\delta=3\omega$ )



# Ионизация многочастотным полем ( $\delta=3\omega$ )



# Аттосекундная метрология в НИИЯФ МГУ

№01 январь 2021  
**НАУКА И ЖИЗНЬ**

<https://m.nkj.ru/archive/articles/40470/>

## Десять значимых событий 2020 года в физике и астрономии

### 4. Лазеры достигли аттосекундного диапазона

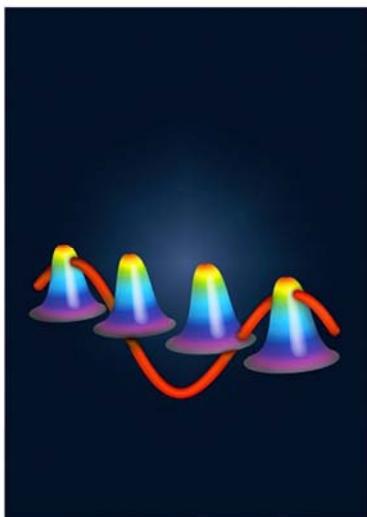
Для изучения очень быстрых процессов, подобных движению электронов в веществе, нужен инструмент, работающий на порядок быстрее. Движения электронов в атомах происходят за время порядка нескольких аттосекунд ( $1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$ ). Это время настолько мало, что свет за 1 ас проходит расстояние,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

<https://www.nkj.ru/archive/articles/40470/>

### Учёные НИИЯФ МГУ: рентгеновские лазеры прорвались в аттосекундный диапазон



Сотрудники НИИЯФ МГУ в составе международного коллектива учёных предложили и разработали способ генерации аттосекундных импульсов лазером на свободных электронах и их диагностику. Статья опубликована в журнале Nature. Результаты работы могут быть использованы на рентгеновских лазерах на свободных электронах с временной когерентностью и открывают новые возможности для исследований в области структурной биологии, драг-дизайна и медицины.

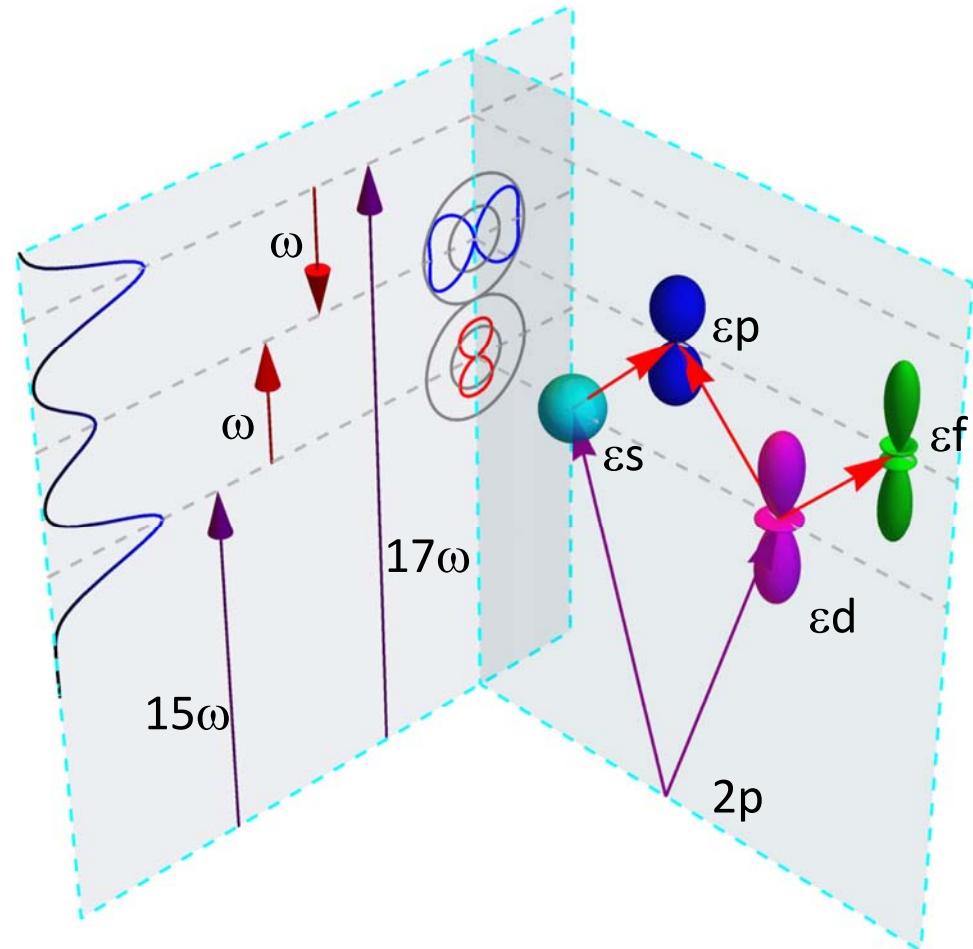
Для изучения динамики процесса во времени требуется инструмент, способный реагировать на события на порядок быстрее, чем собственно происходит процесс. Чем меньше длительность электромагнитных импульсов, тем более быстрые процессы можно с их помощью изучить и управлять ими. Аттосекундный масштаб характерен для движения электронов в атомах и аттосекунду свет проходит расстояние, соответствующее типичному размеру атома. Более интенсивные импульсы в широком диапазоне электромагнитных волн генерируются рентгеновскими лазерами на свободных электронах, но их длительность до сих пор превышала 10 фемтосекунд — 1000 аттосекунд. «Генерация более коротких импульсов с заданными свойствами лазерами на свободных электронах — актуальная задача. Она тесно связана с задачей диагностики формы и длительности таких импульсов», — рассказал один из авторов работы, ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ, доктор физико-математических наук Алексей Грум-Гржимайло.

В работе с участием теоретиков НИИЯФ МГУ предложен и реализован способ генерации аттосекундных импульсов лазером на свободных электронах и их диагностики. Сотрудники НИИЯФ МГУ Алексей Грум-Гржимайло и Елена Грызлова внесли определяющий вклад в теоретическое обоснование метода, экспериментально реализованного международным коллективом из стран на пока единственном в мире рентгеновском лазере на свободных электронах FERMI (Италия), обладающем временной когерентностью.

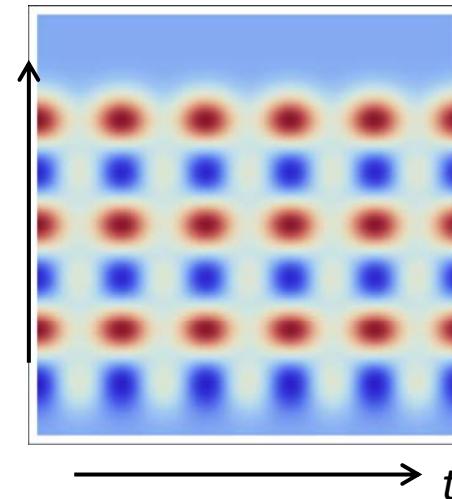
<https://www.msu.ru/press/smiaboutmsu/rentgenovskie-lazery-prorvalis-v-attosekundnyy-diapazon.html>

# RABBITT спектроскопия в угловых распределениях

**RABBITT**- Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of Two-photon Transitions



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

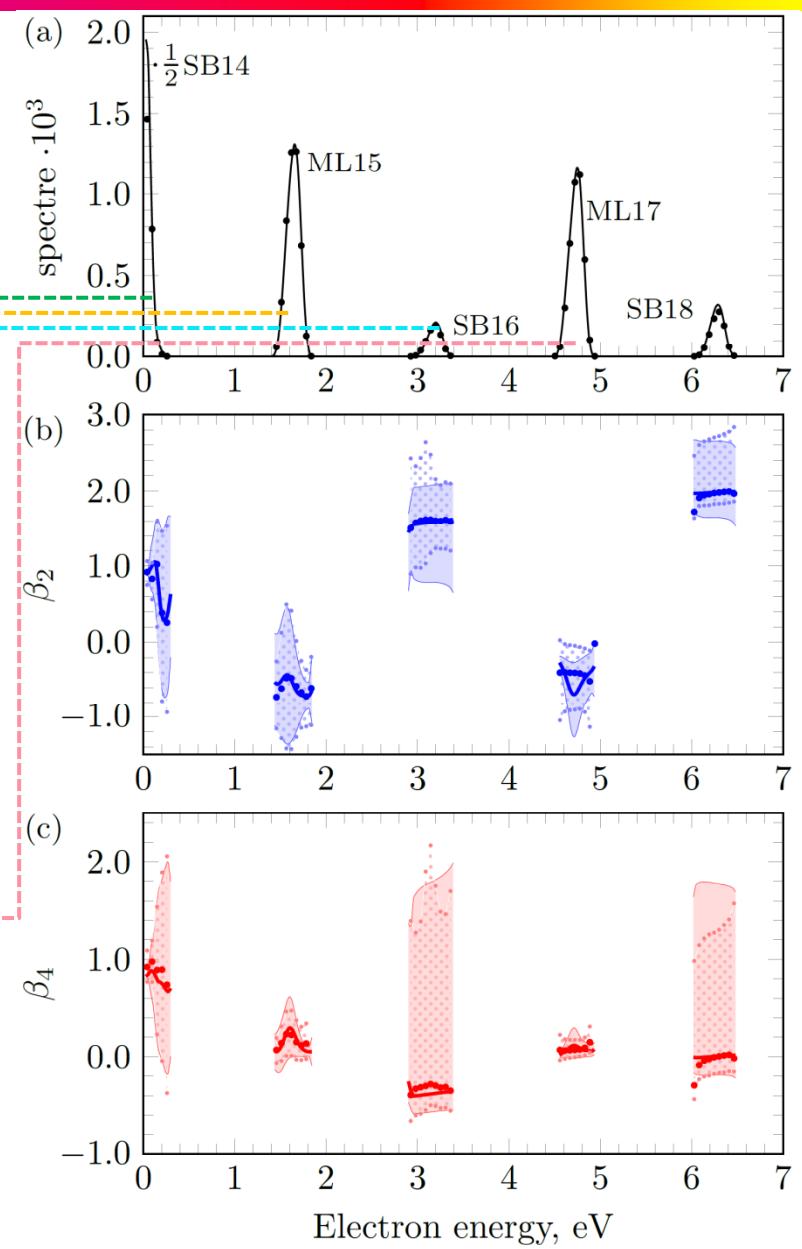
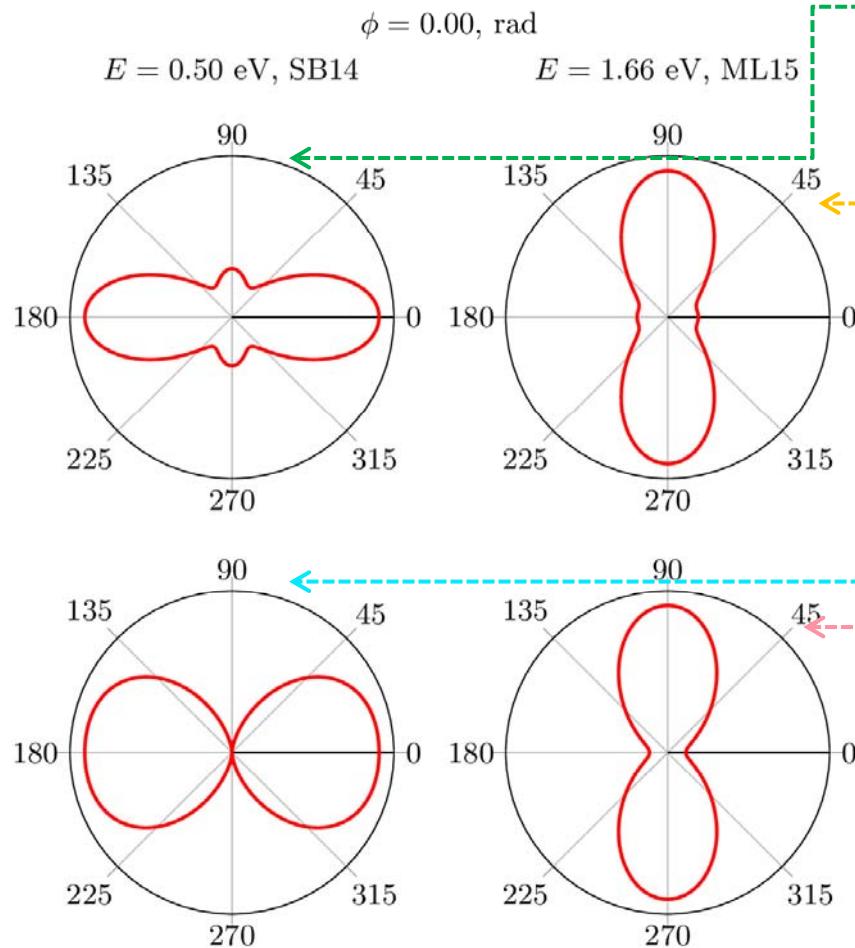


Изначально в RABBITT спектроскопии анализировали полную вероятность испускания электронов, но аналогичные осцилляции могут наблюдаться и в дифференциальных характеристиках, то есть угловых распределениях или ориентации спина

# Расчеты дифференциальных вероятностей

Вероятность электрона вылететь под определенным углом параметризуется

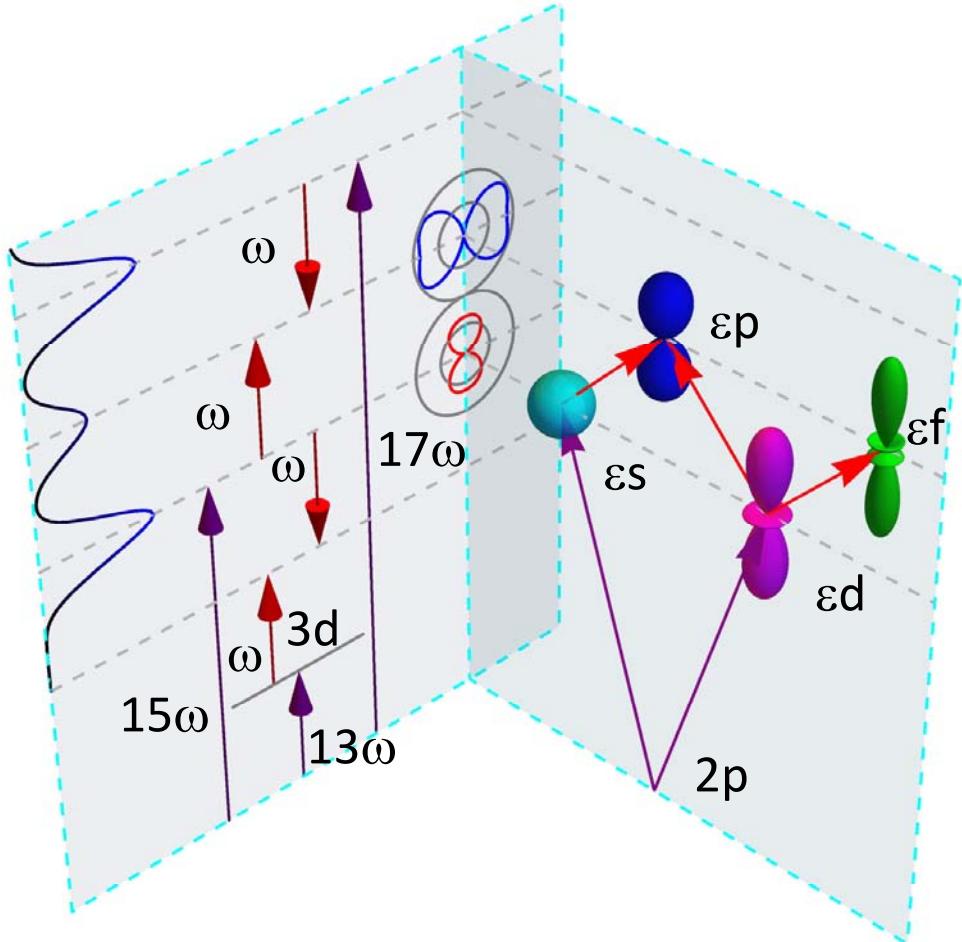
$$W(\theta) = W_0(1 + P_2(\cos \theta) + P_4(\cos \theta))$$



# RABBITT при участии дискретных состояний

**RABBITT**- Reconstruction of Attosecond  
Beating By Interference of Two-photon  
Transitions

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



## Заключение

---



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**