

# Аттосекундная метрология, достижения и перспективы

Е.В. Грызлова

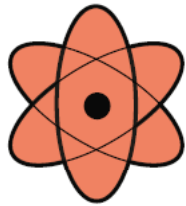
М.М. Попова, С.Н. Юдин, М.Д. Киселев, Ф.Н. Грум-гржимайло



21 декабря, Москва, Россия

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

# Аттосекунда



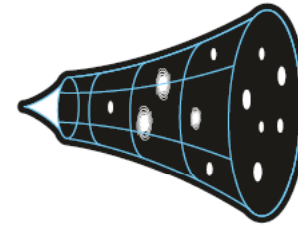
ATTOSECOND

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



HEARTBEAT

1 SECOND



AGE OF THE UNIVERSE

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



# Начало фотографии

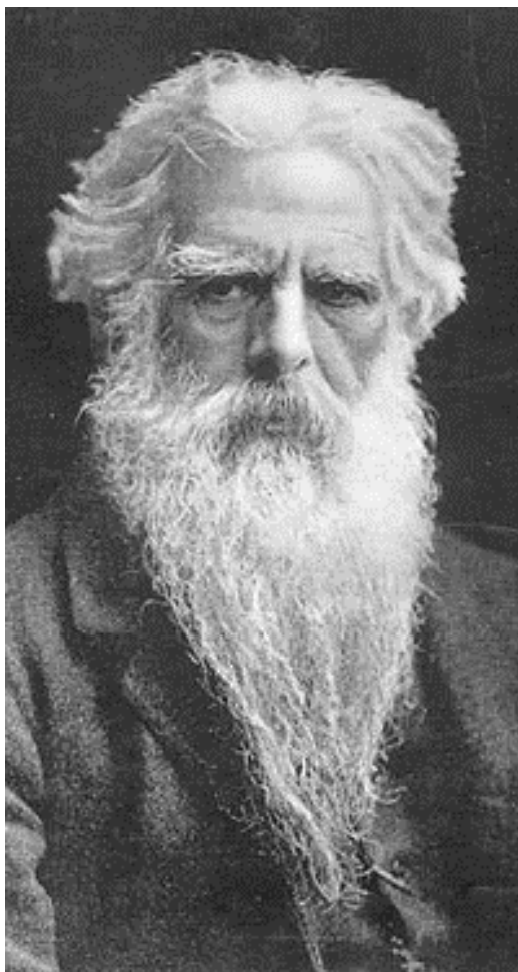


Луи Даггер 1838



# Начало хронофотографии

---

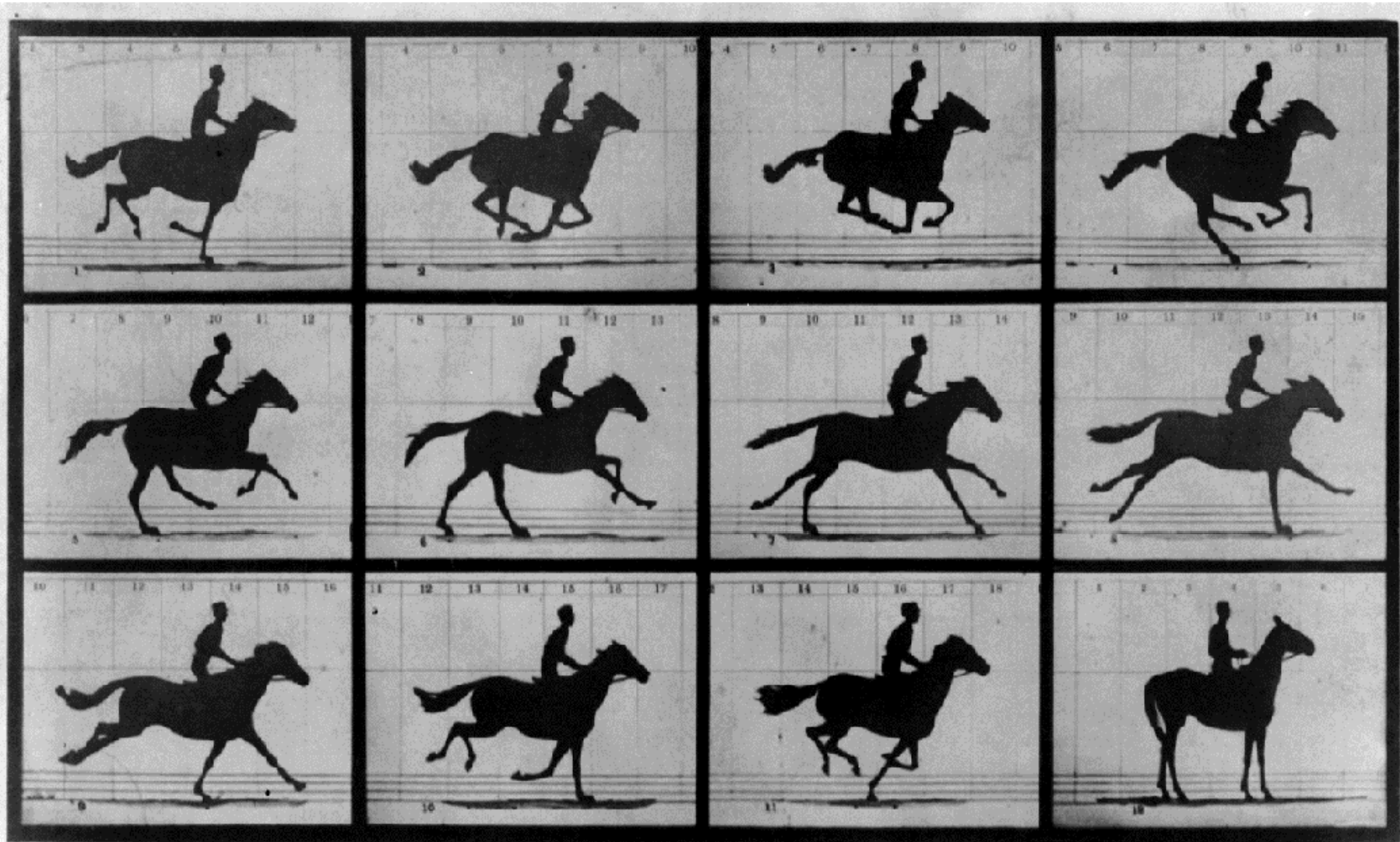


**Эдвард Мейбридж**  
Eadweard Muybridge  
(1830-1904)



**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.

AUTOMATIC ELECTRO-PHOTOGRAPH.

"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.

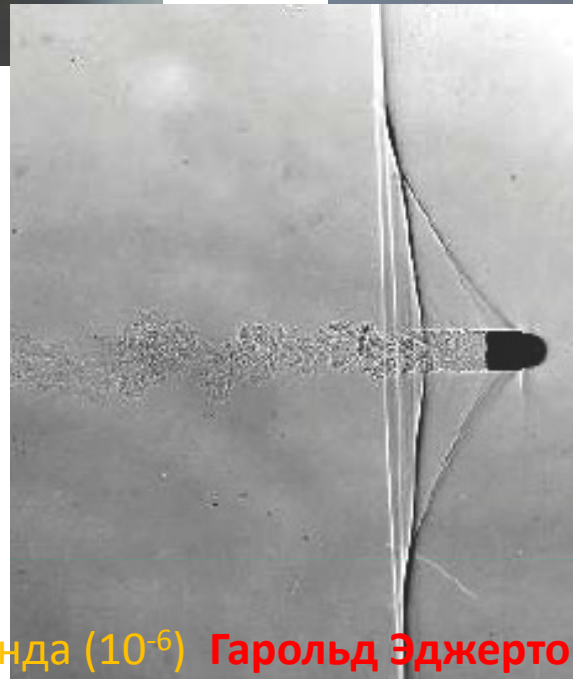
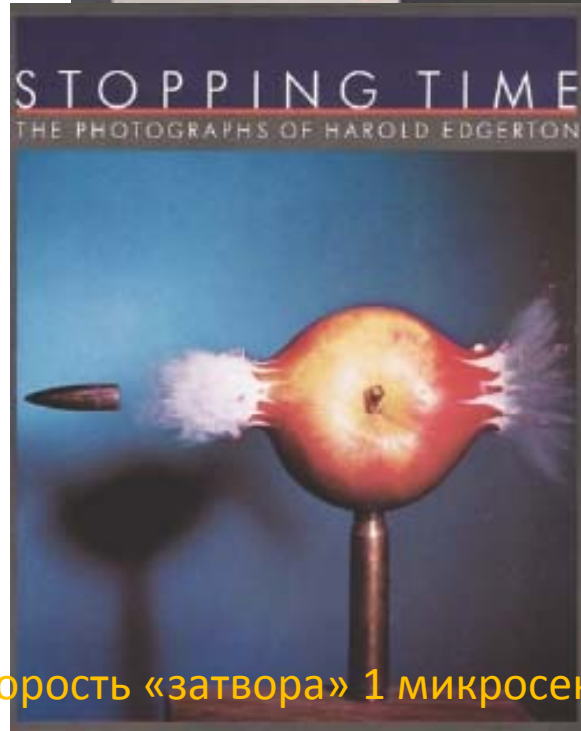
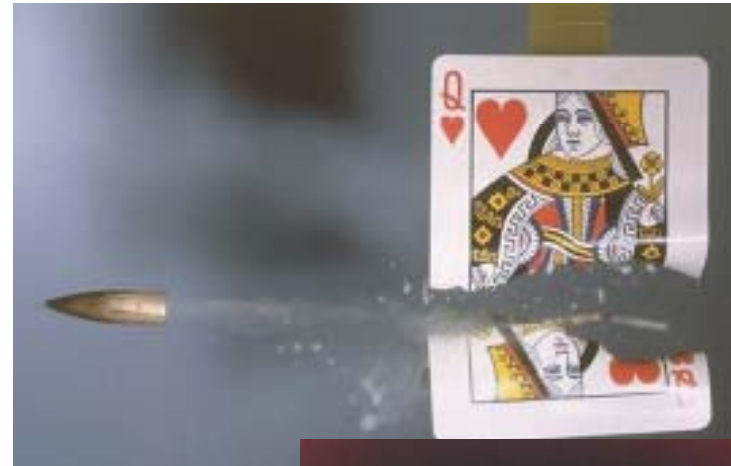
# Начало хронофотографии

---



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

# Развитие хронофотографии



Скорость «затвора» 1 микросекунда ( $10^{-6}$ ) Гарольд Эджертон (Harold Edgerton), с 1930



# Развитие хронофотографии

---



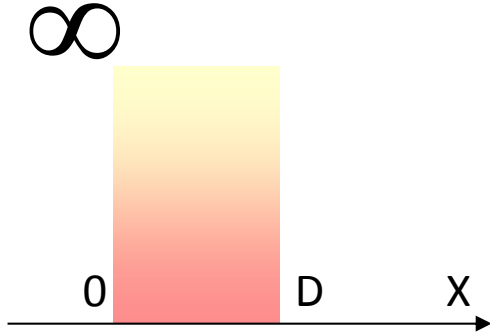
Ядерный взрыв; скорость затвора Керра в камере - до 10 наносекунд ( $10^{-8}$ ). Harold Edgerton, 1952



**Гарольд Эджертон**  
Harold Edgerton  
1903 – 1990

# Оценка времени эволюции пакета

Эволюция пакета в прямоугольном потенциале

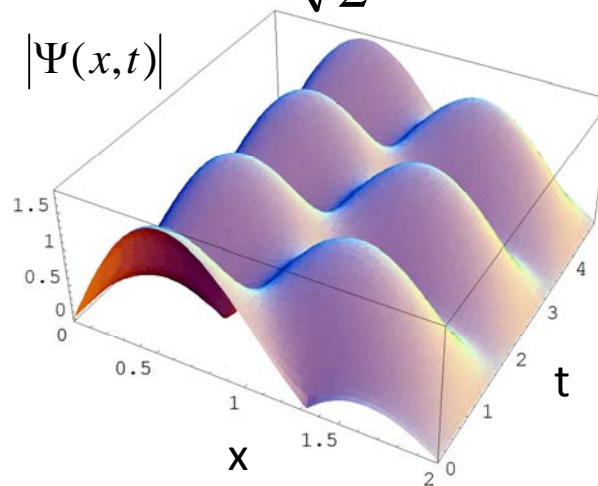
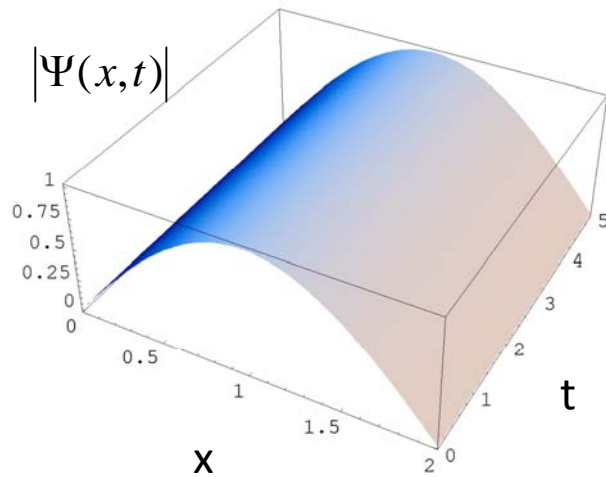


$$E_n = \frac{\pi^2 n^2}{2D^2}, \psi_n(x) = \sin \sqrt{2E_n} x$$

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

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

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

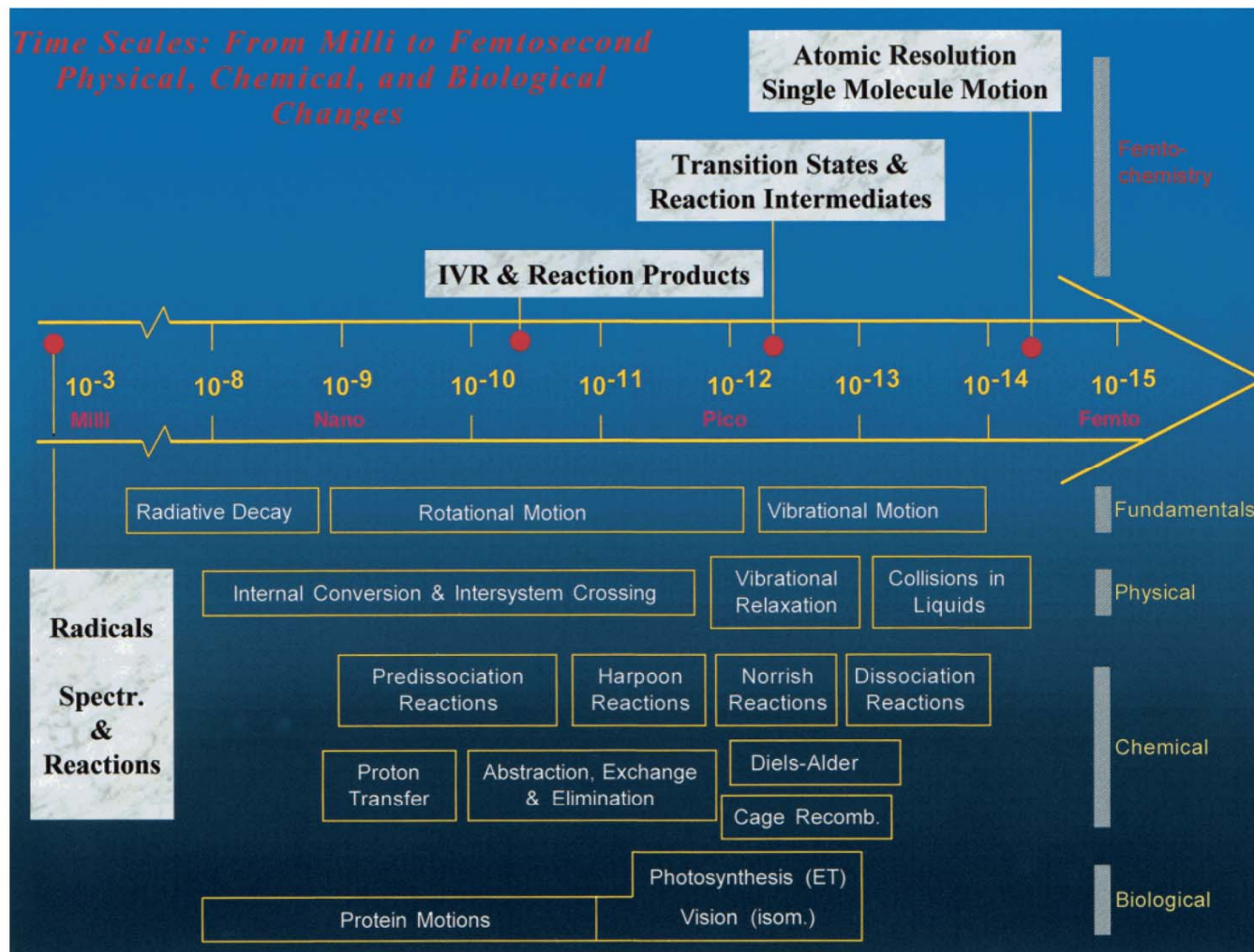


# ФЕМТОХИМИЯ

Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond†

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

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



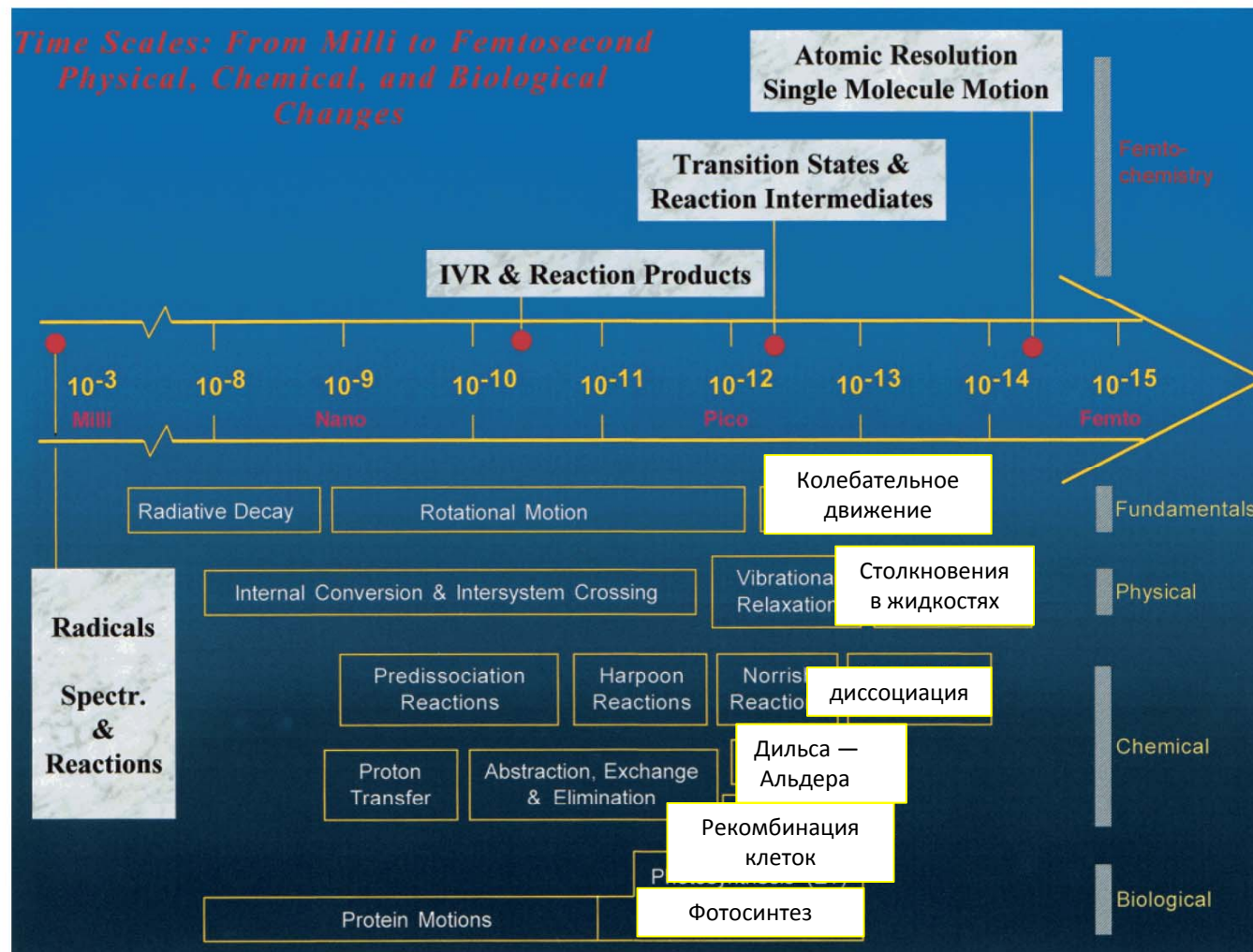


# ФЕМТОХИМИЯ

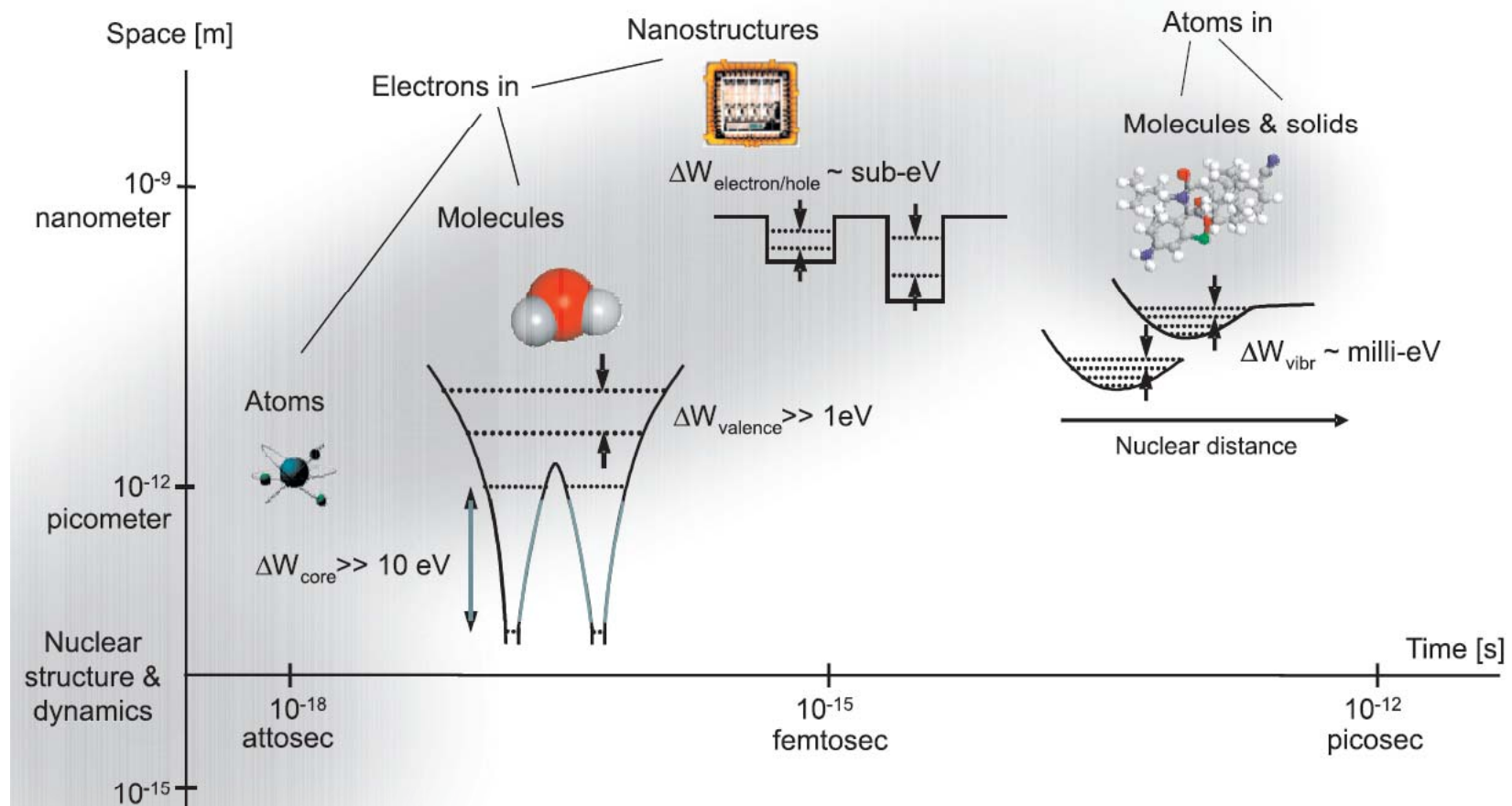
Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond†

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

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



# Шкала времен для быстрых процессов

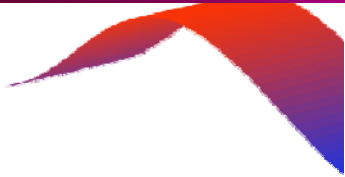


Атомная физика: исследование скорости фотоэмиссии и электронных корреляций.

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



100 км

1мм

1мкм

радио  $10^{-11}$ с

$10^{-14}$ с

Микроволновое



# Шкала длин электромагнитных волн



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



# Шкала длин электромагнитных волн

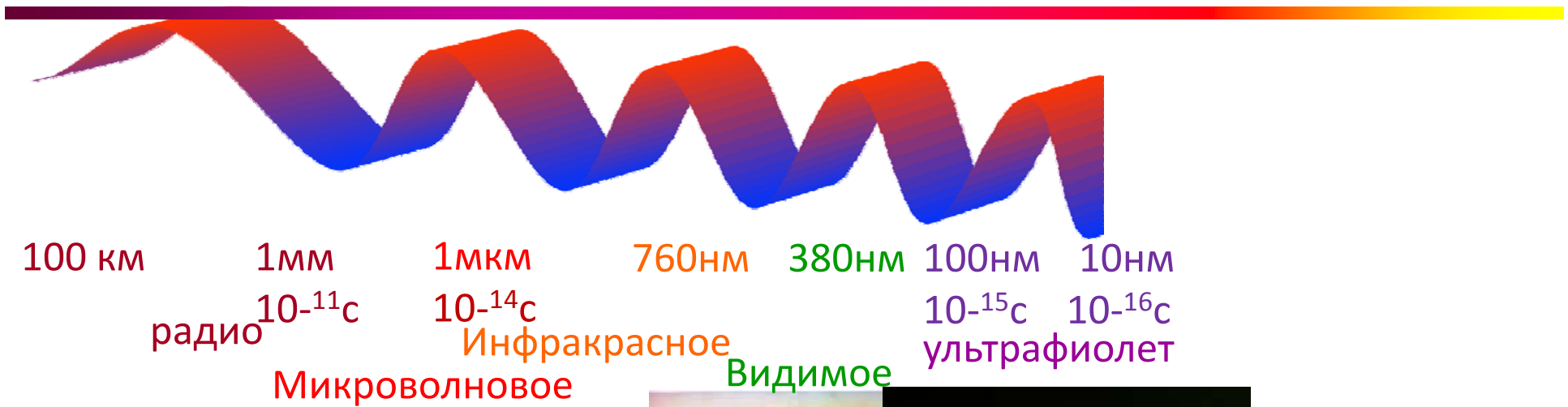


100 км      1мм      1мкм      760нм      380нм  
радио  $10^{-11}$ с       $10^{-14}$ с  
Микроволновое      Инфракрасное      Видимое

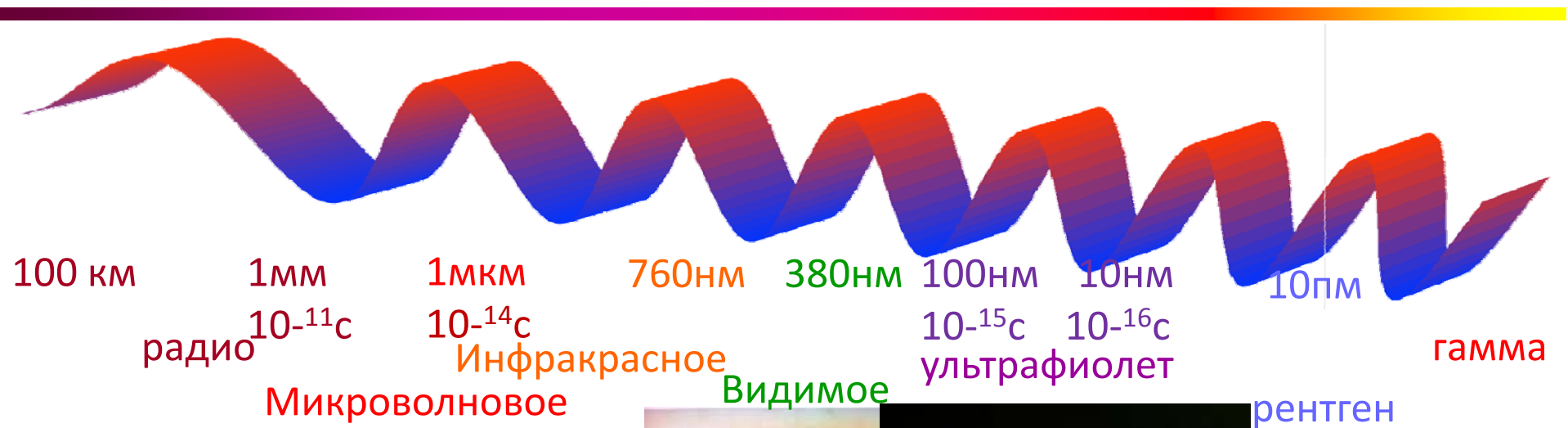




# Шкала длин электромагнитных волн

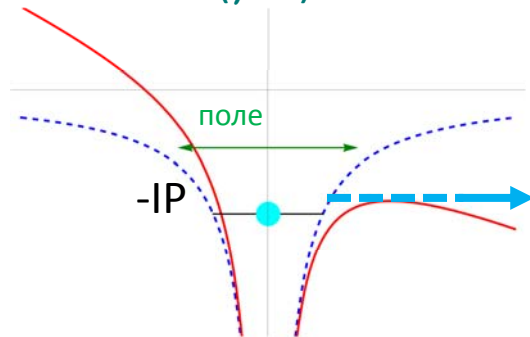


# Шкала длин электромагнитных волн



# Взаимодействие оптического и ВУФ излучения с атомами

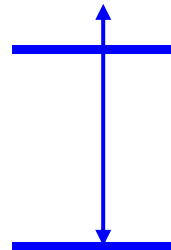
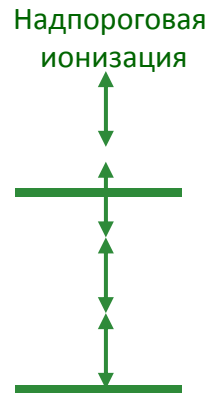
Туннельная ионизация  
( $\gamma \sim 1$ )



Фотоэффект

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

Ионизация  $A + \gamma \rightarrow A^+ + e^-$



$\omega = 0$

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

$\omega = 3.9 \text{ eV}$

$\omega = 12.1 \text{ eV}$

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

Туннельная ионизация

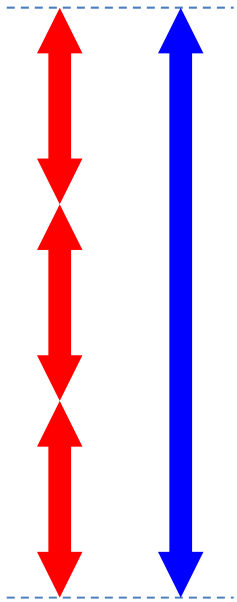
Многофотонная ионизация слабо связанных оболочек

Однофотонная ионизация Cs, K, Na, Rb

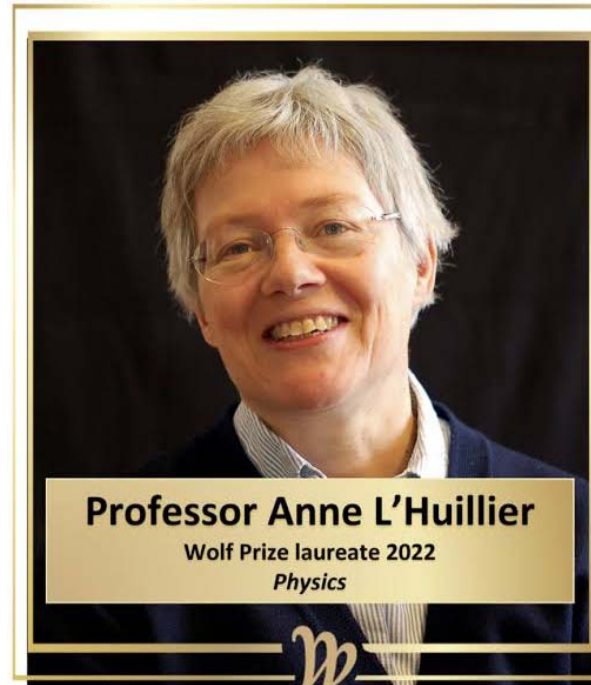
Однофотонная ионизация Ne, Ar, Kr, Xe

Ионизация субвалентных оболочек

# Генерация частот (HHG)



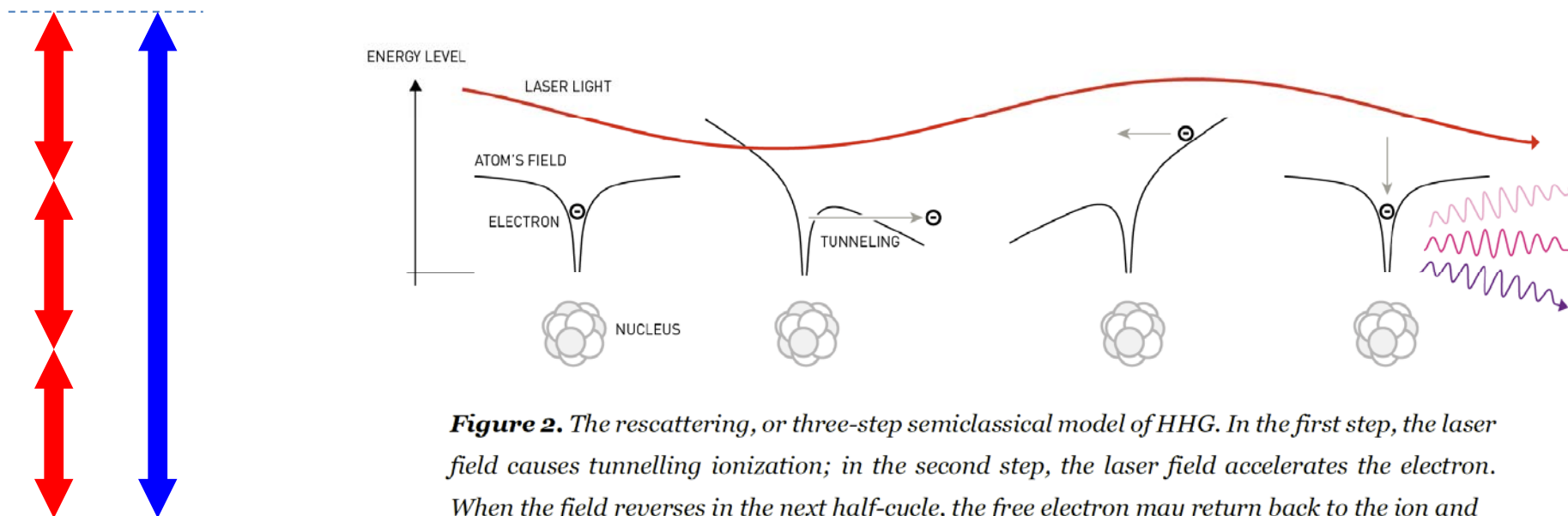
Сложение гармоник



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



# Генерация частот (HHG)



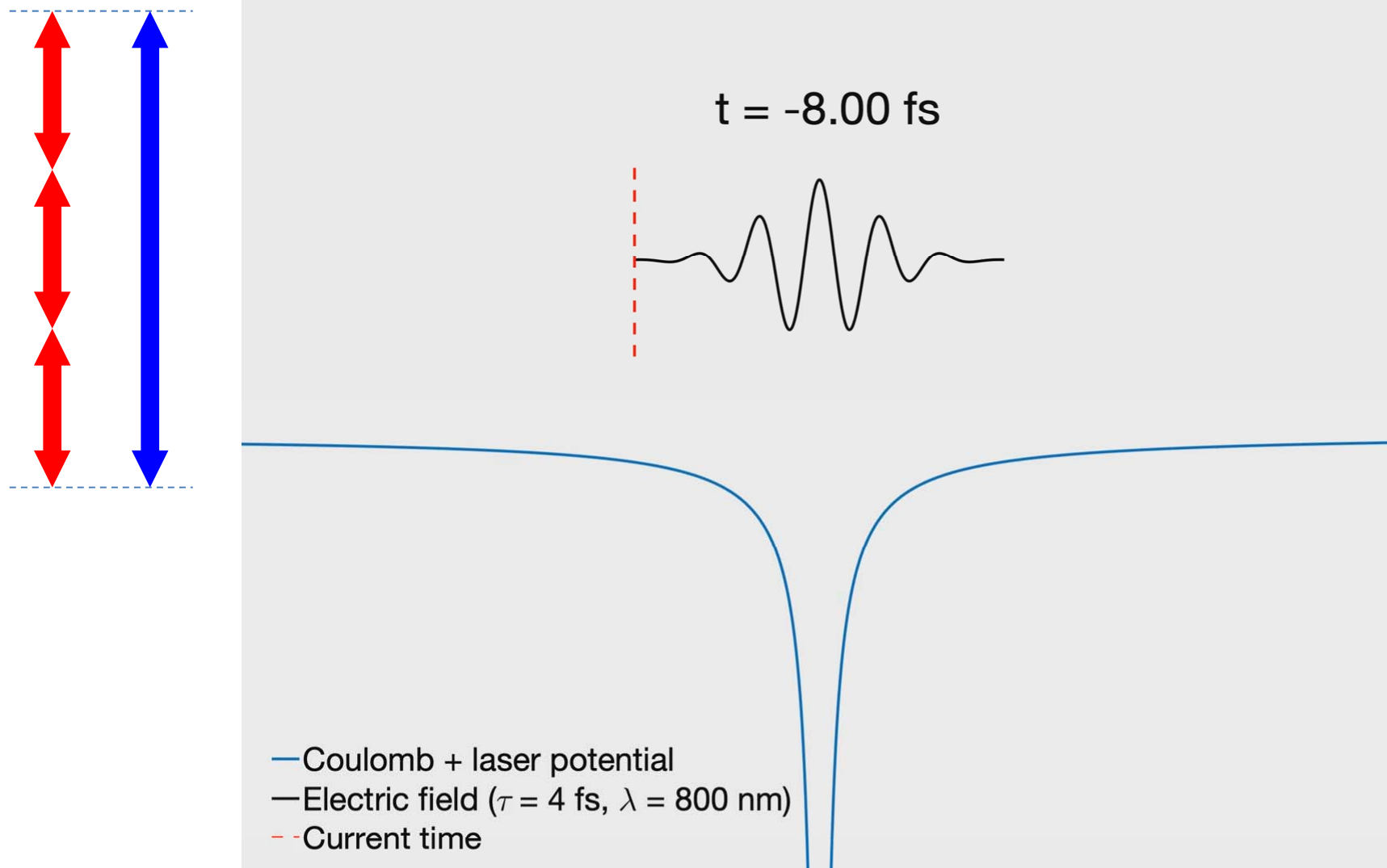
**Figure 2.** The rescattering, or three-step semiclassical model of HHG. In the first step, the laser field causes tunnelling ionization; in the second step, the laser field accelerates the electron. When the field reverses in the next half-cycle, the free electron may return back to the ion and

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

Объяснение механизма

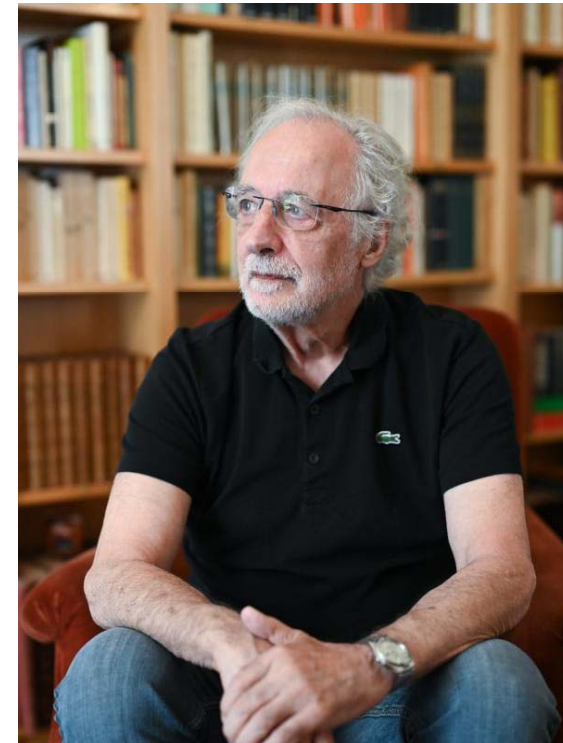
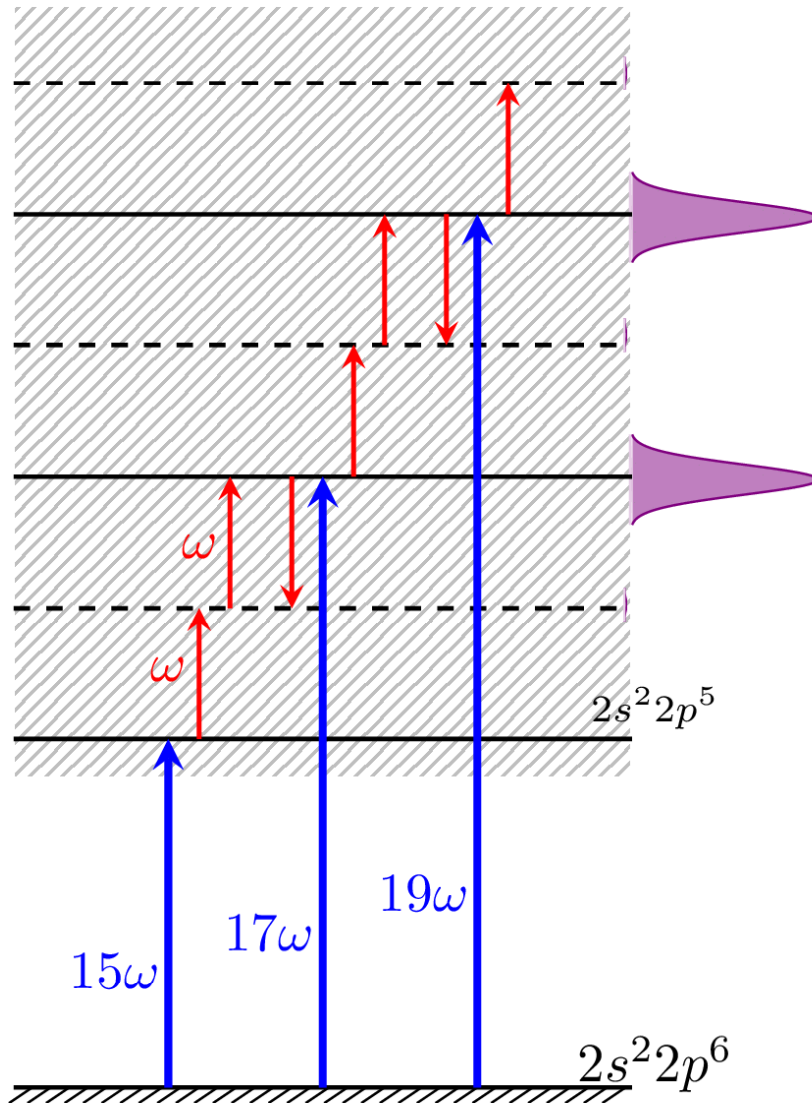
P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).

# Генерация частот (HHG)



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

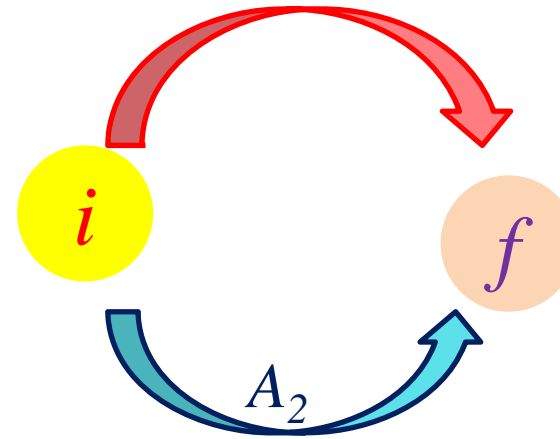
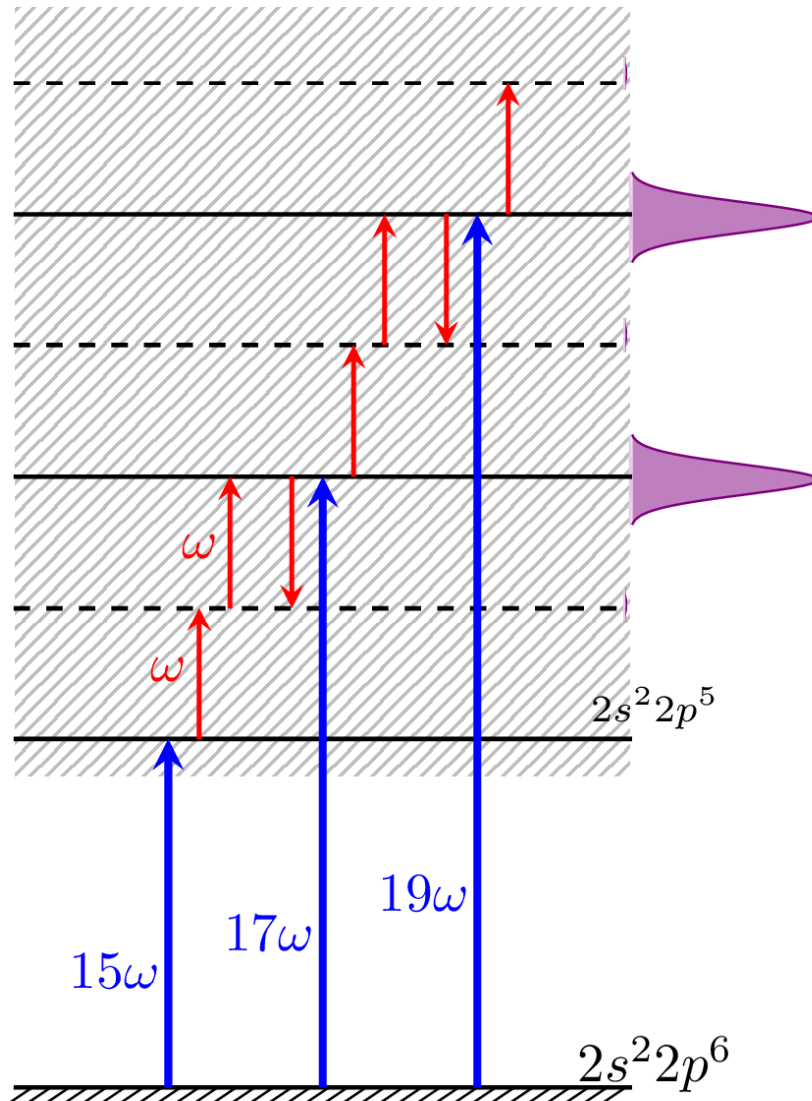
# RABBIT спектроскопия



В 1994 Пьер Агостини (Pierre Agostini) предложил метод, позволяющий характеризовать импульсы электромагнитного излучения с аттосекундной точностью.

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

# RABBIT спектроскопия



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

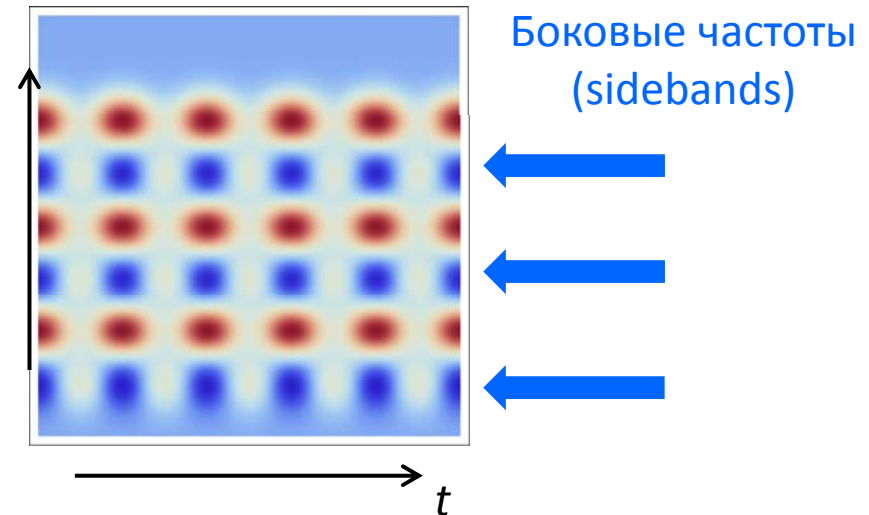
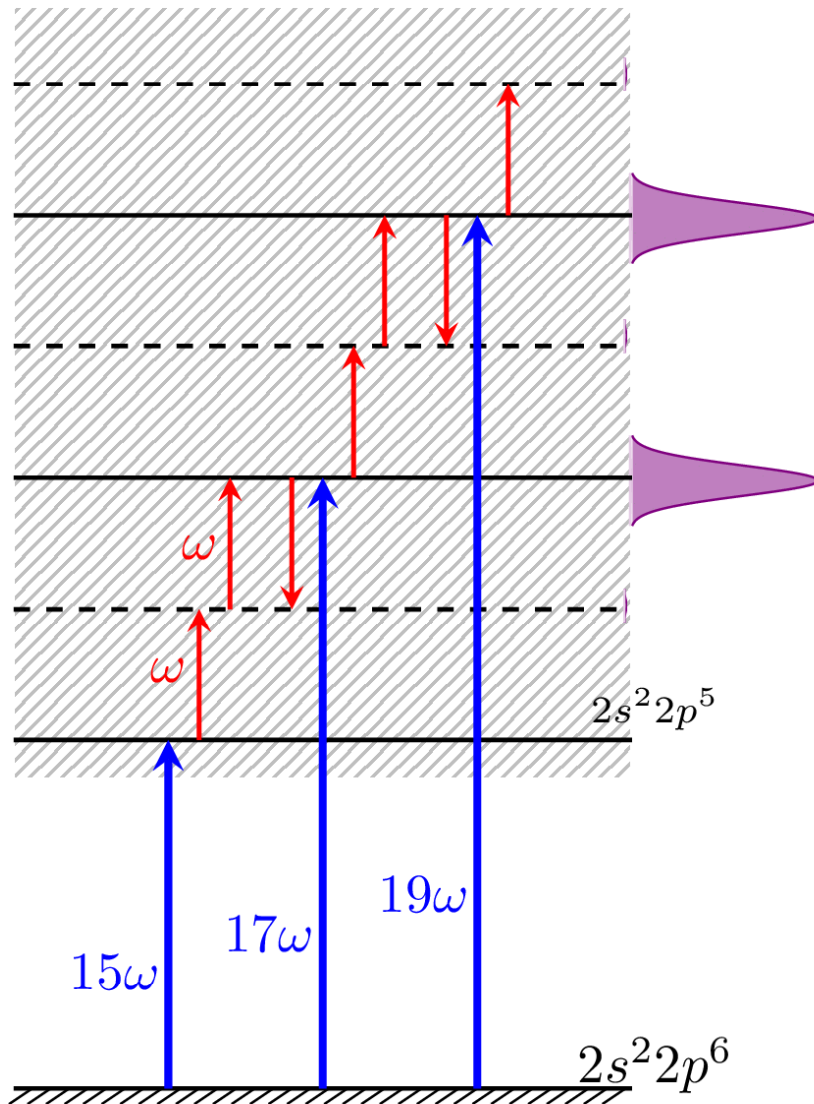
$$\alpha + \beta \cos 2\phi$$

В 1994 Пьер Агостини (Pierre Agostini) предложил метод, позволяющий характеризовать импульсы электромагнитного излучения с аттосекундной точностью.

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.



# RABBIT спектроскопия

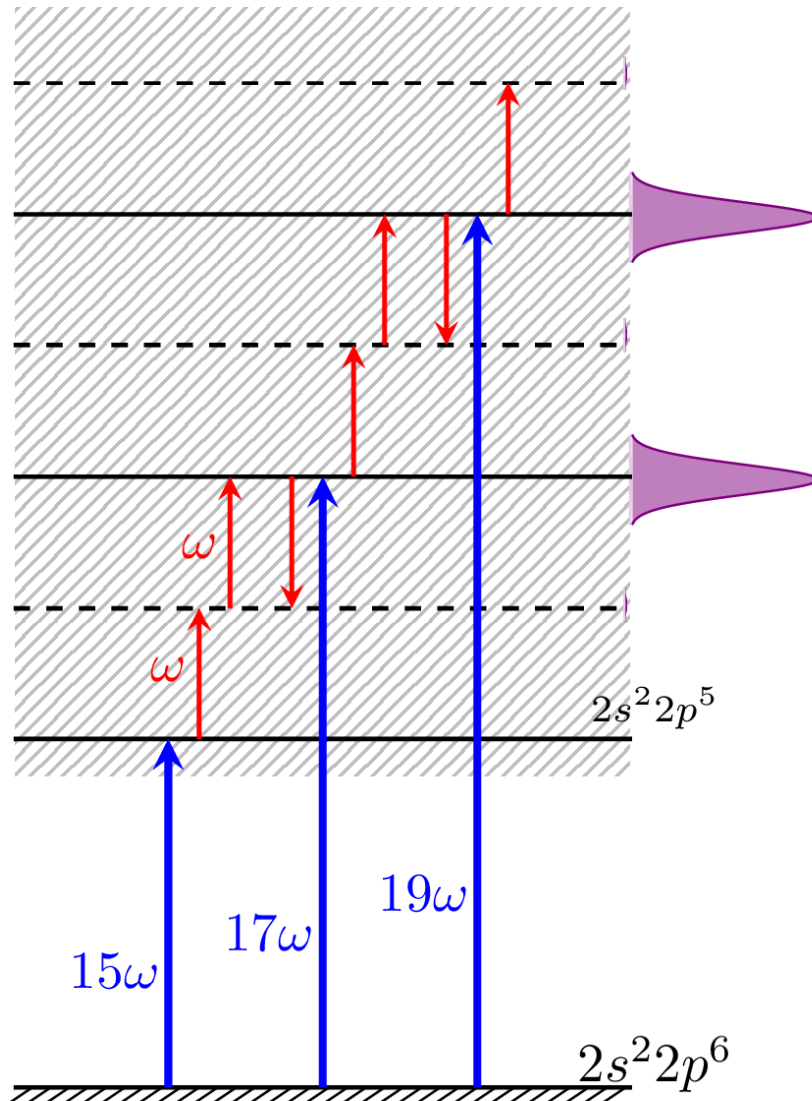


$$\alpha + \beta \cos(2\omega\tau)$$

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.

# RABBIT спектроскопия

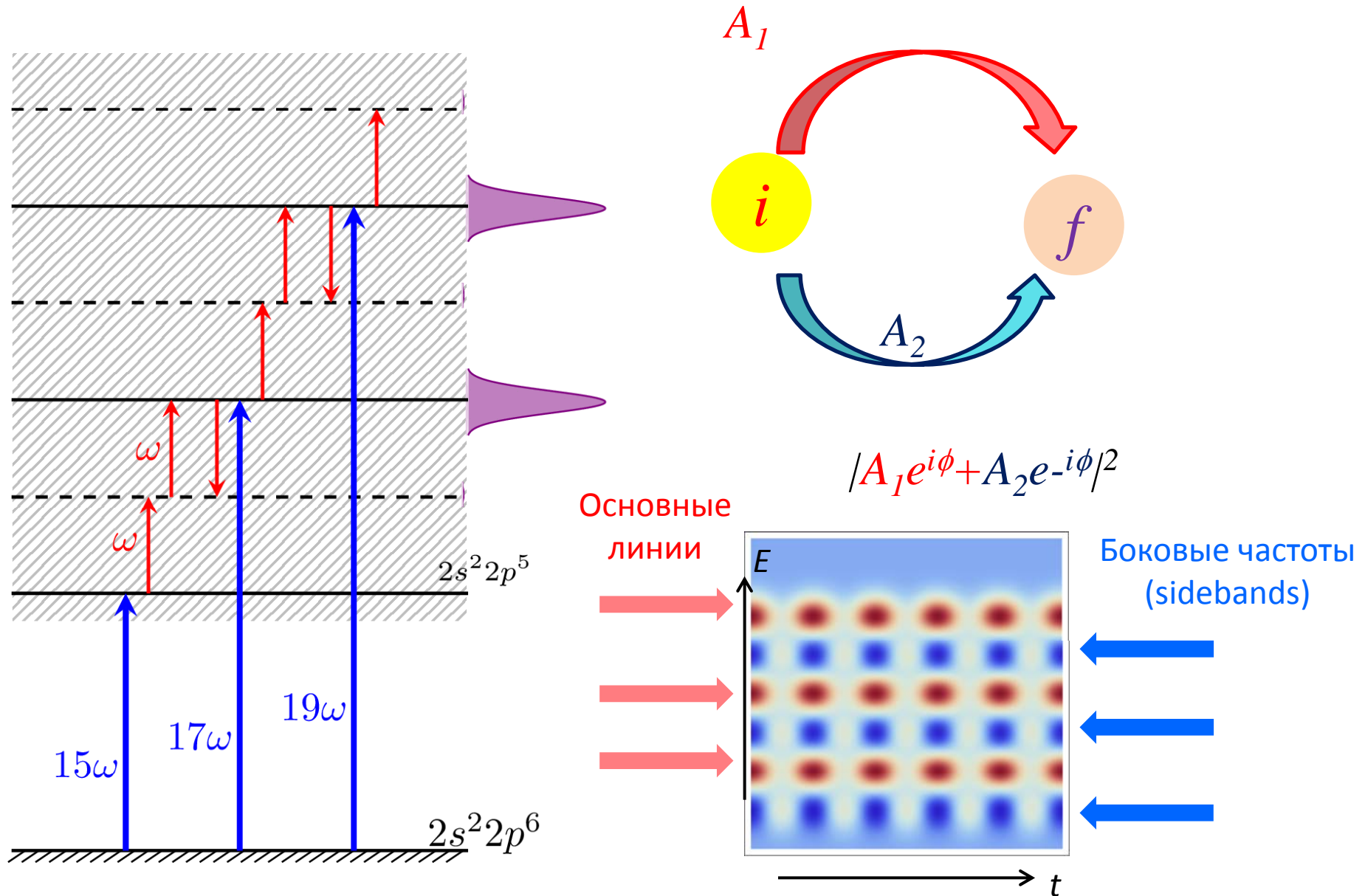


$$\alpha + \beta \cos(2\omega\tau)$$

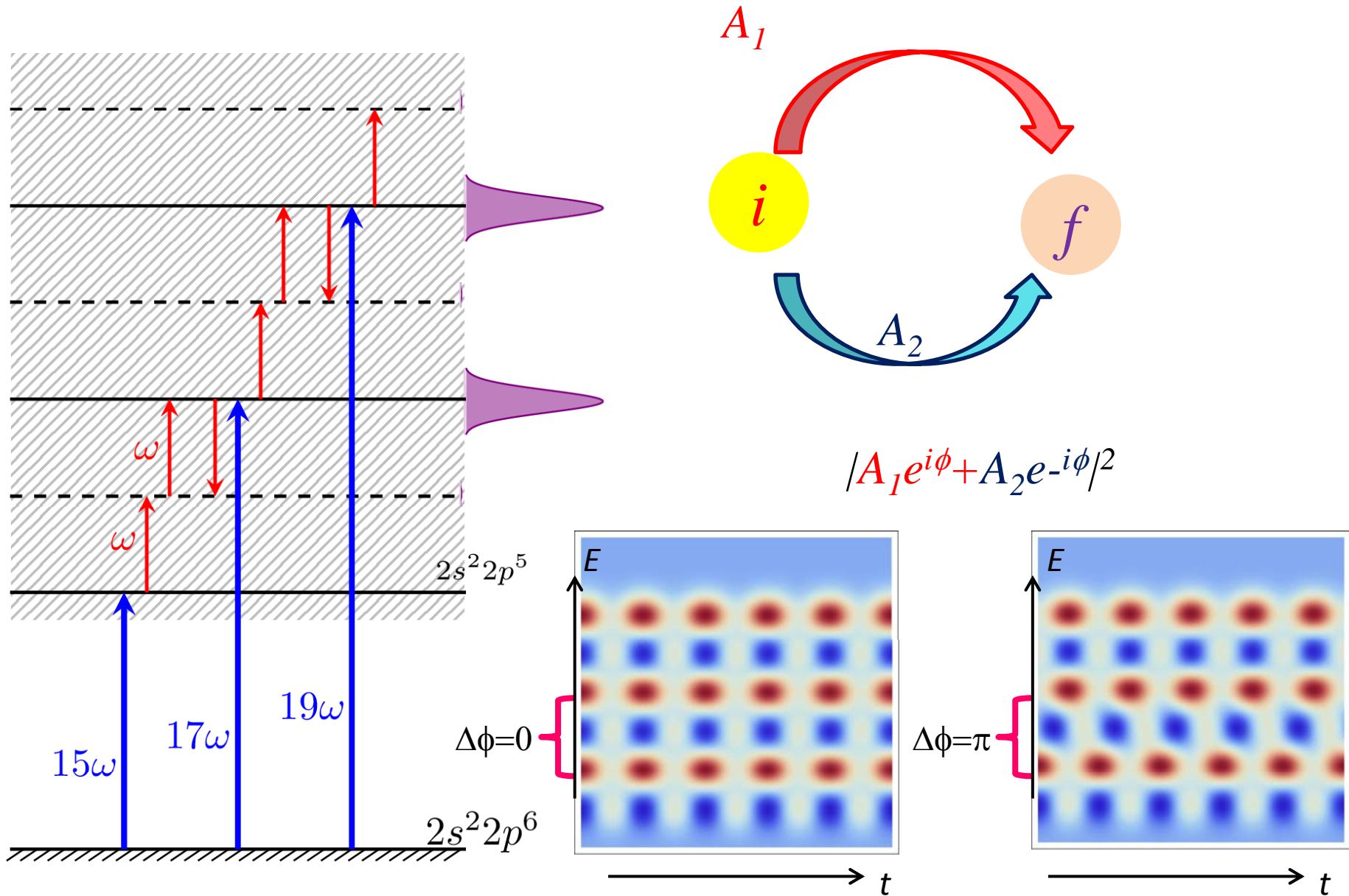
Интерференция путей перехода с поглощением и испусканием ИК-фотона вызывает осцилляции в интегральной вероятности фотоэмиссии

RABBIT - reconstruction of attosecond beating by interference of two-photon transitions.

# Определение фазы гармоники



# Определение фазы гармоники





# Самый короткий импульс

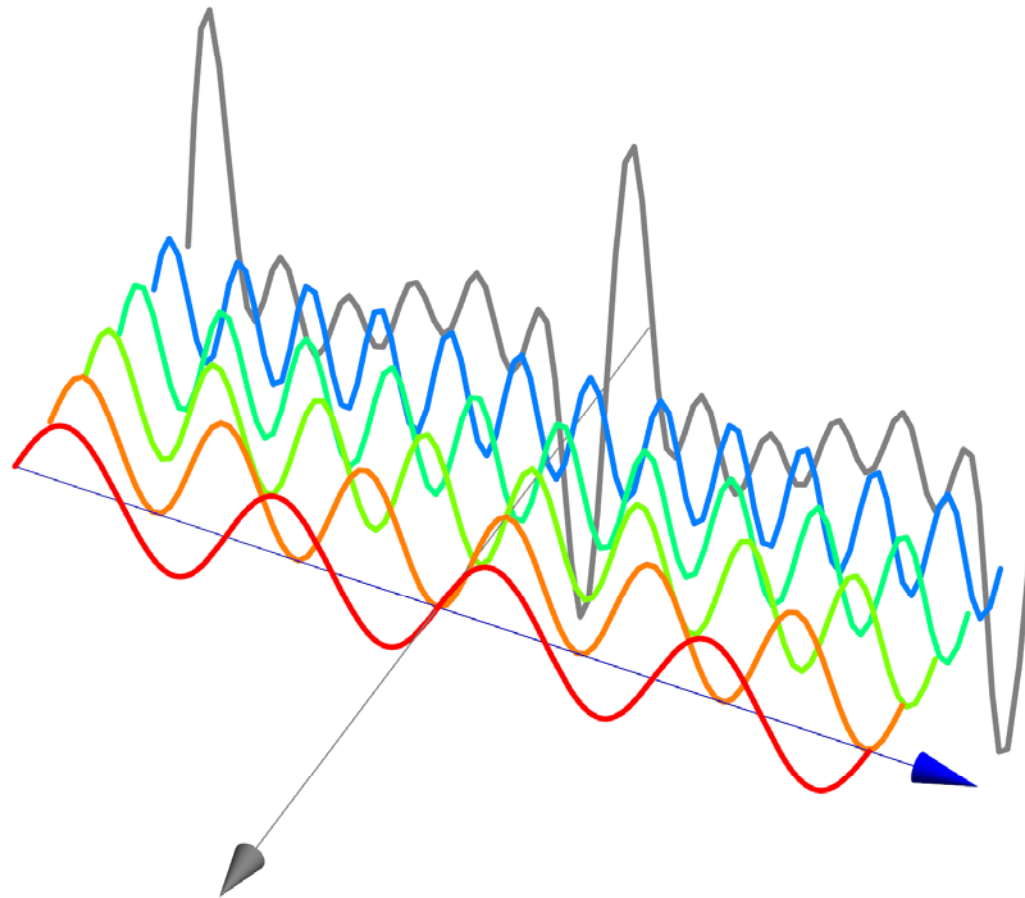
---



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

# Создание последовательности коротких импульсов

---

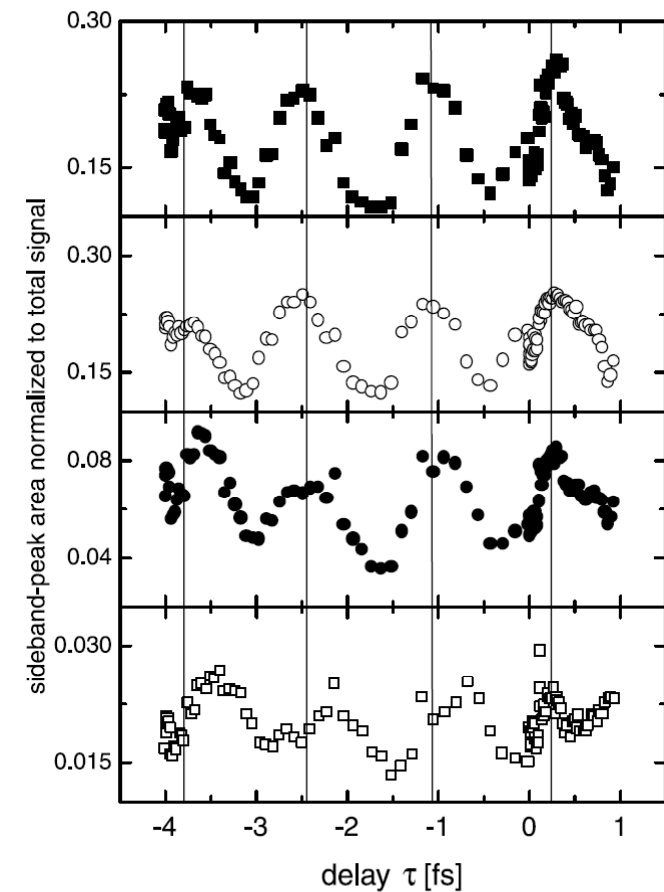
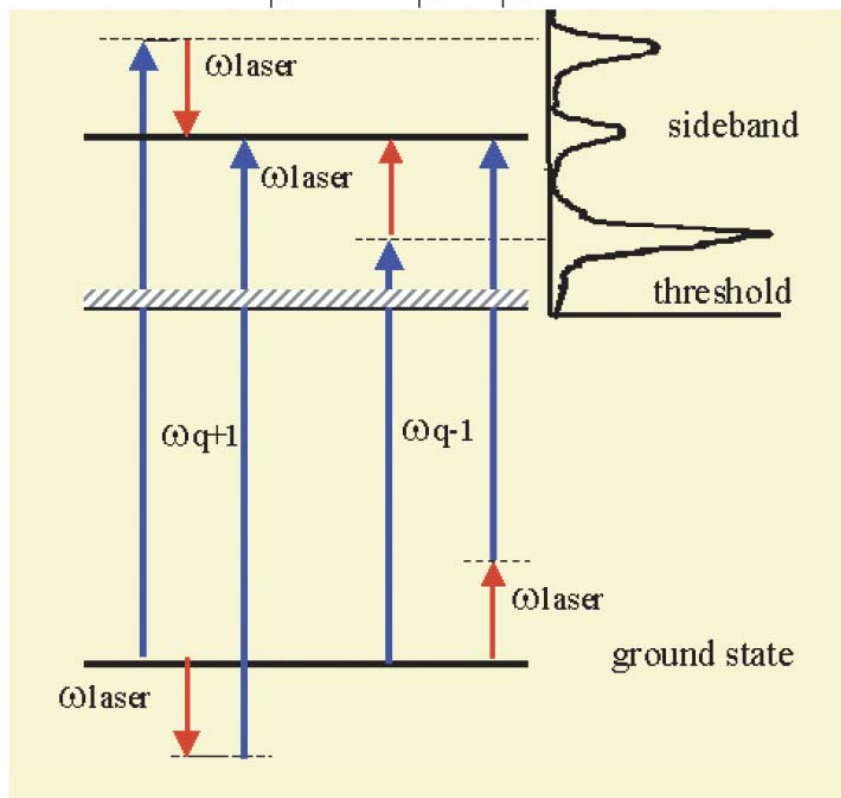


# Создание последовательности коротких импульсов

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

*Science* **292**, 1689 (2001);

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

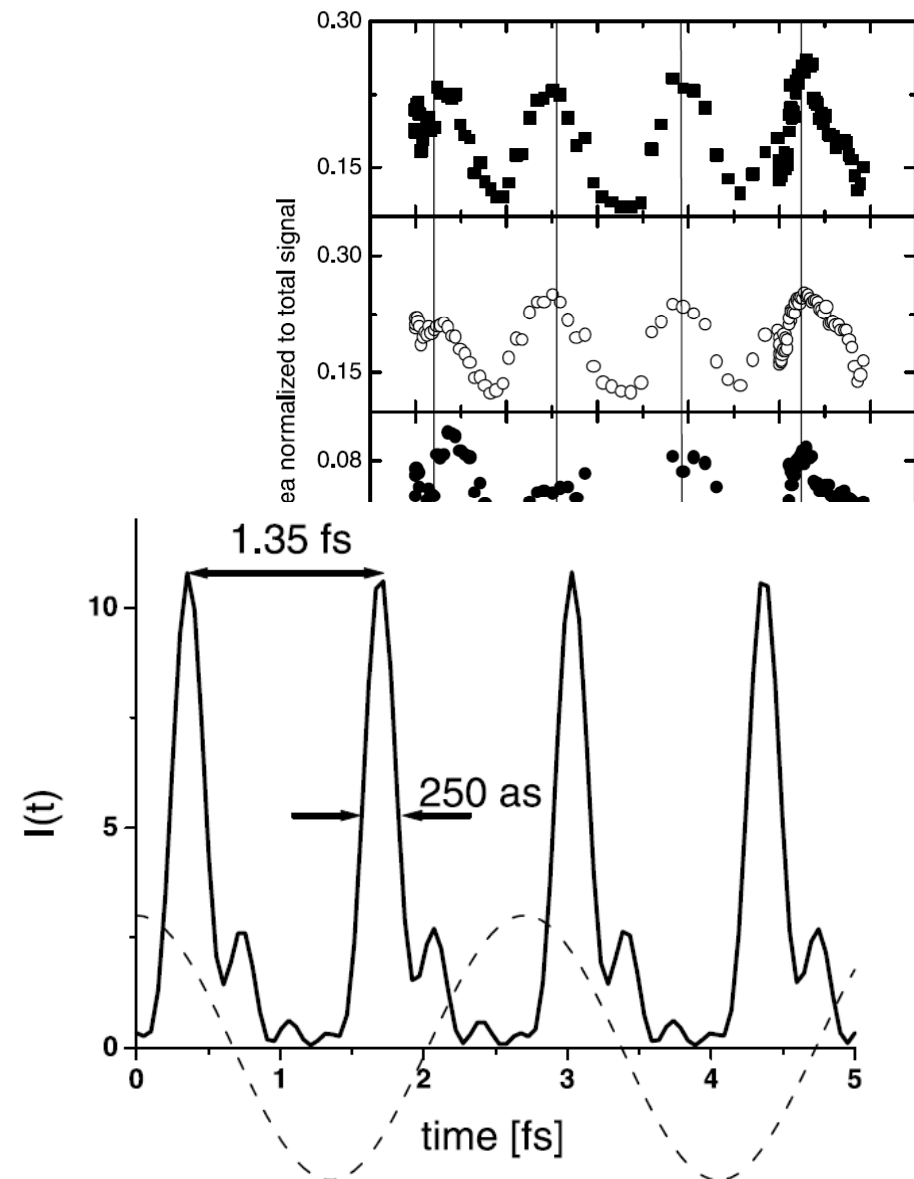
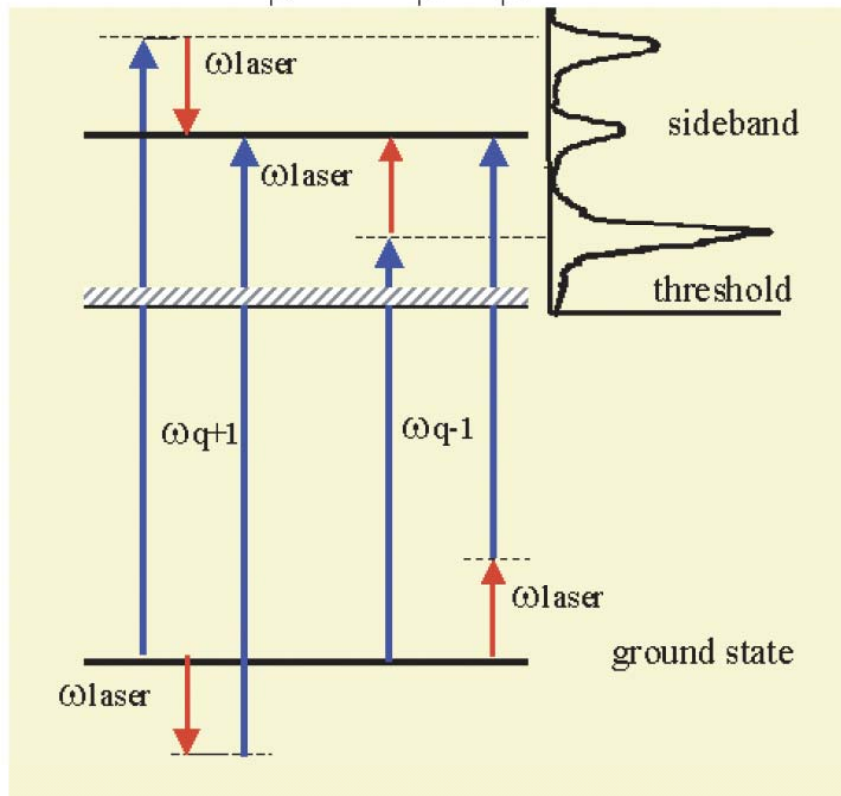


# Создание последовательности коротких импульсов

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

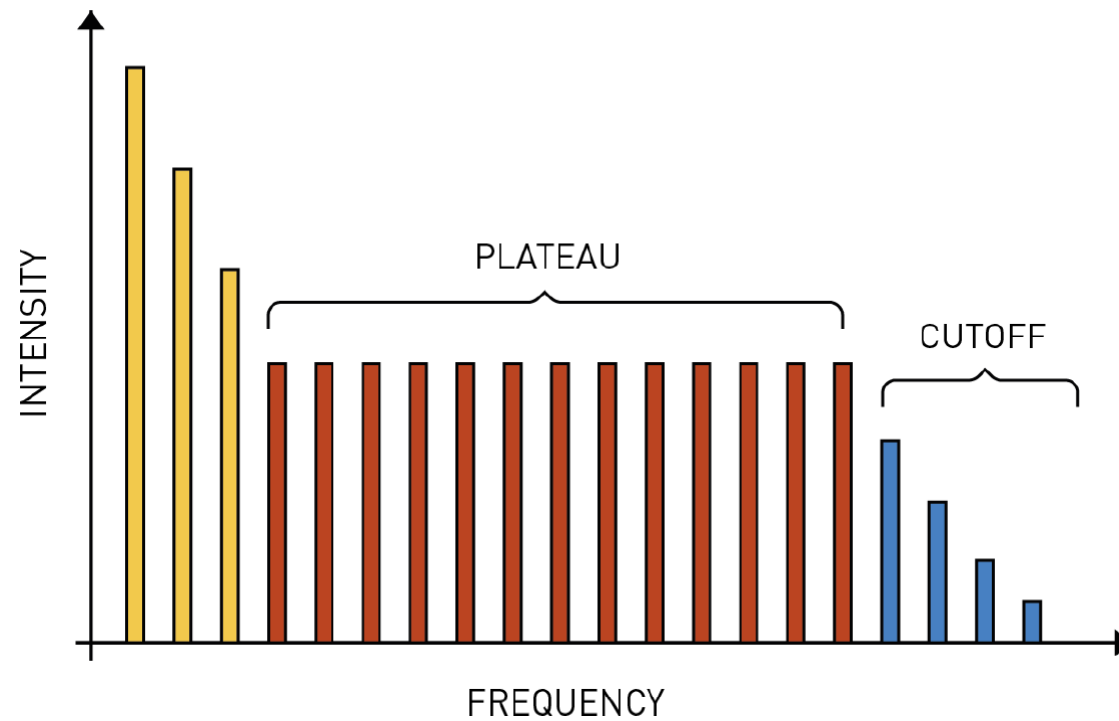
*Science* **292**, 1689 (2001);

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

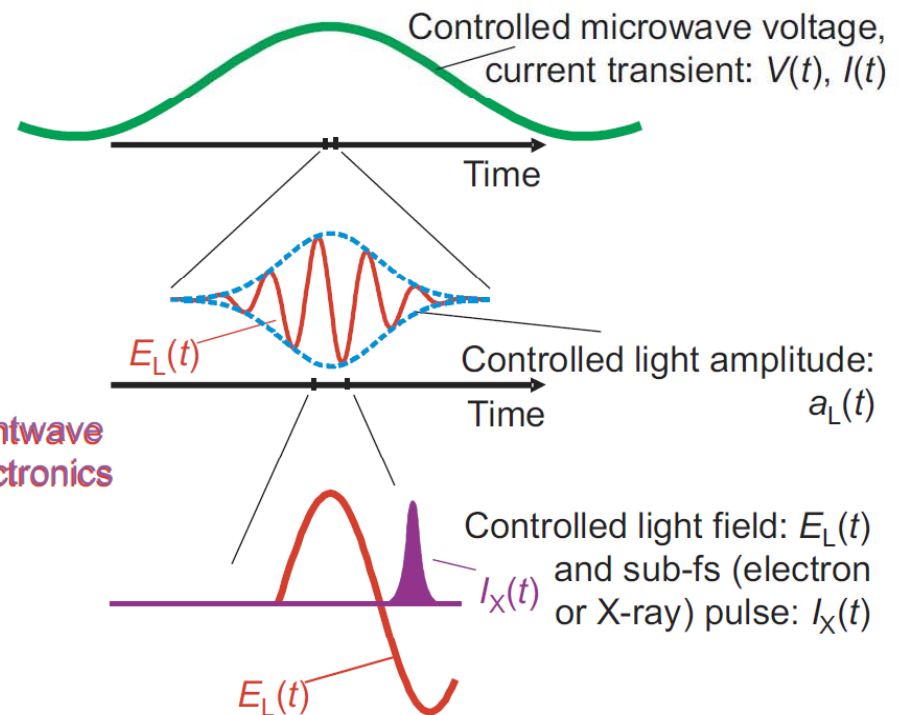
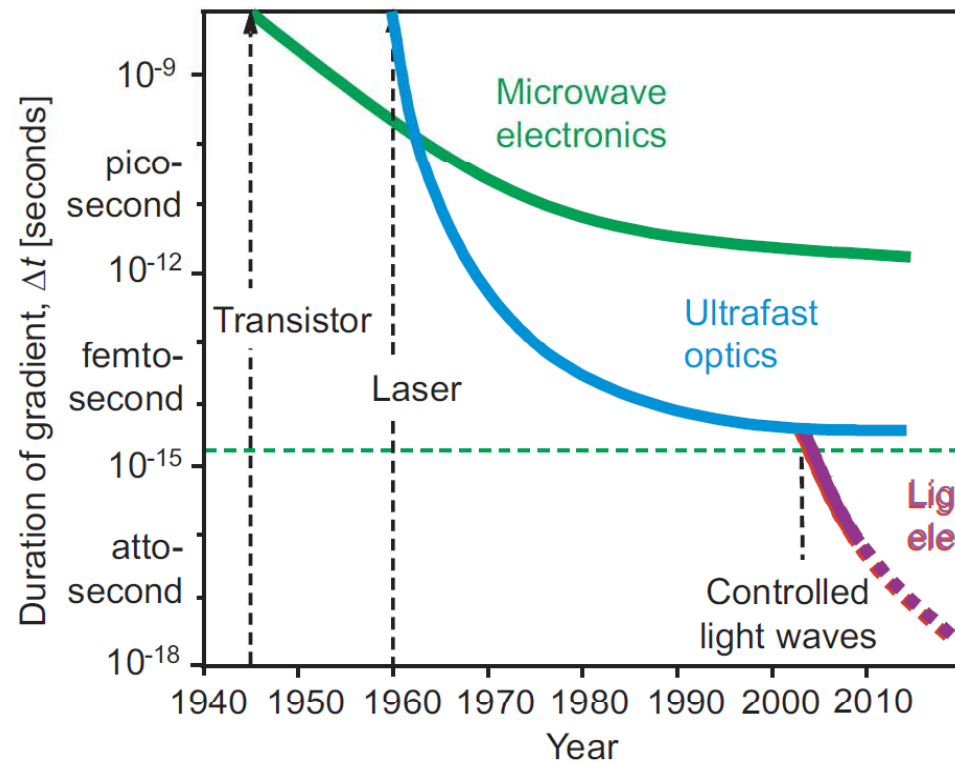




# Плато в генерации гармоник



# Эволюция «затворов»

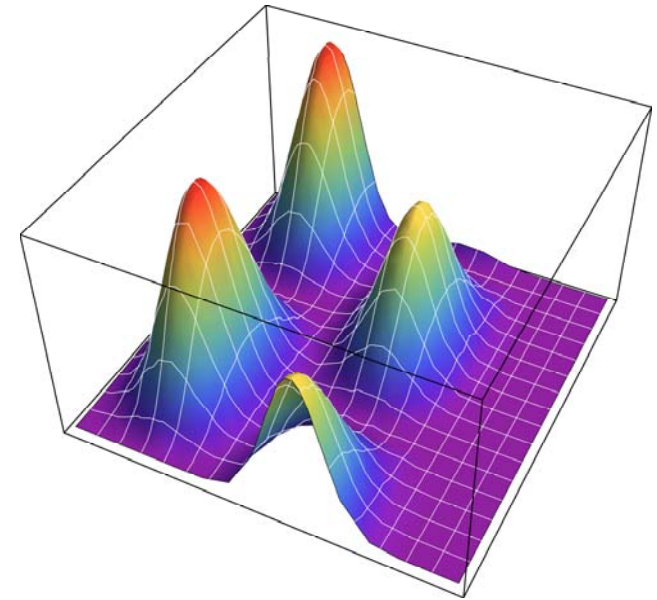
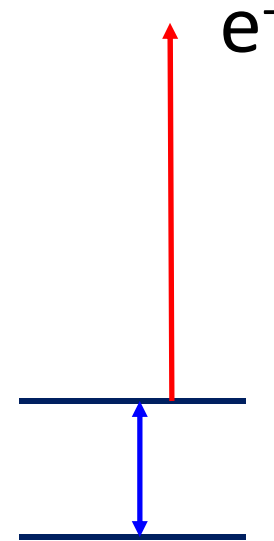
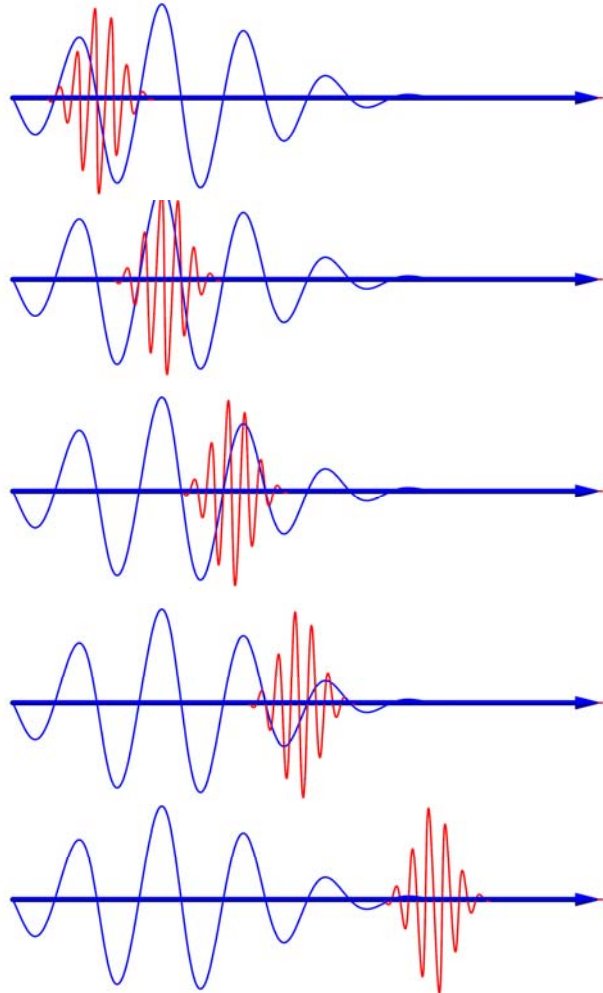


Ferenc Krausz

**Attosecond physics**

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, 81 163 (2009)

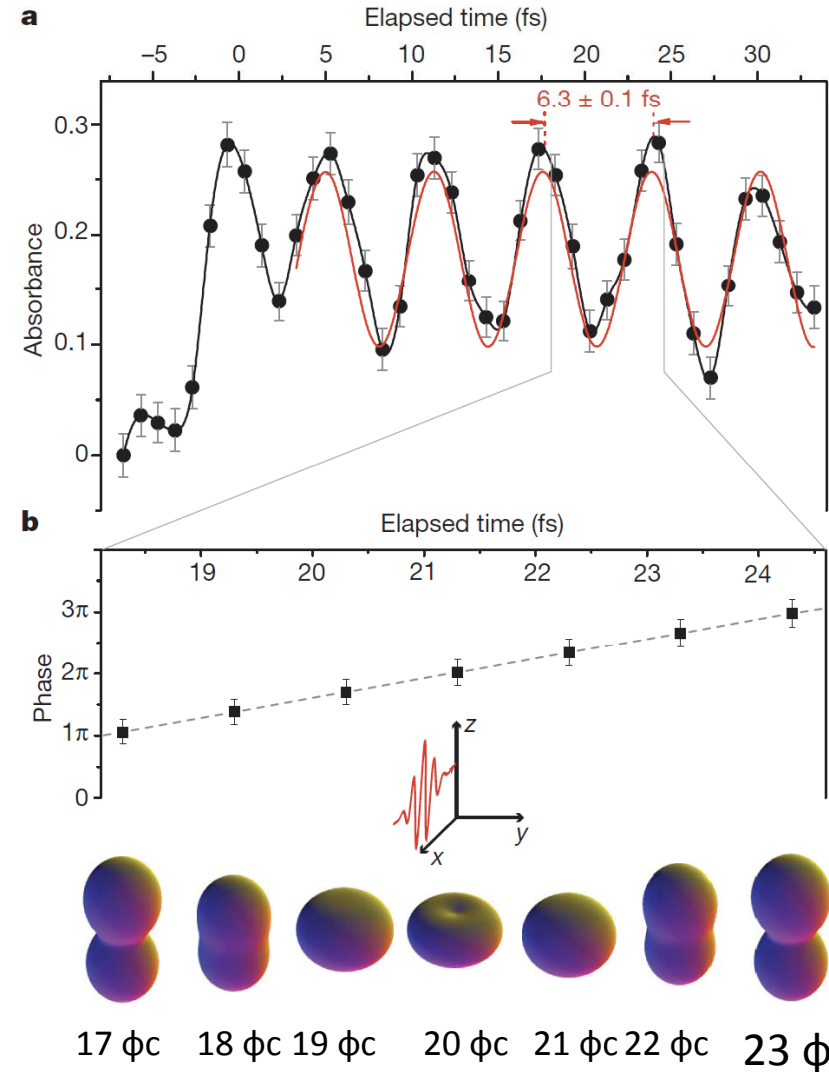
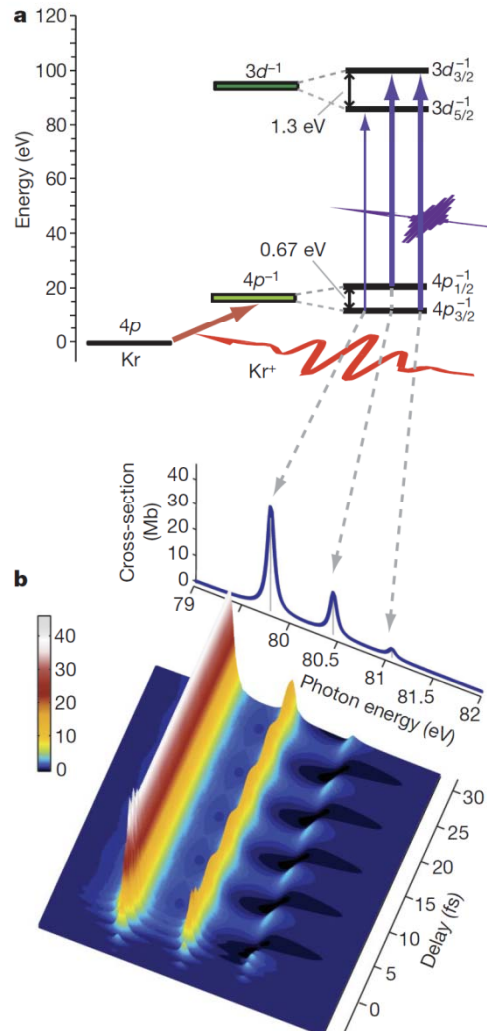
# STREACING спектроскопия



В 2001 Ференц Краус (Ferenc Krausz) использовал метод streaking 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, 76!



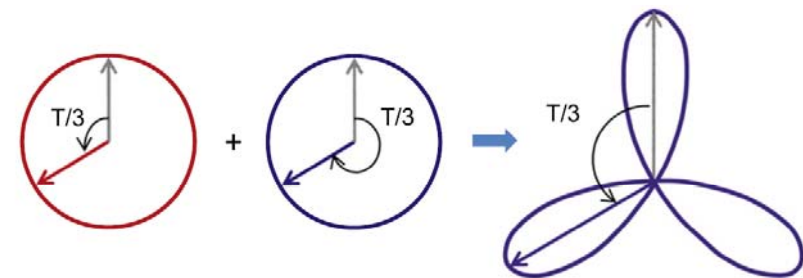
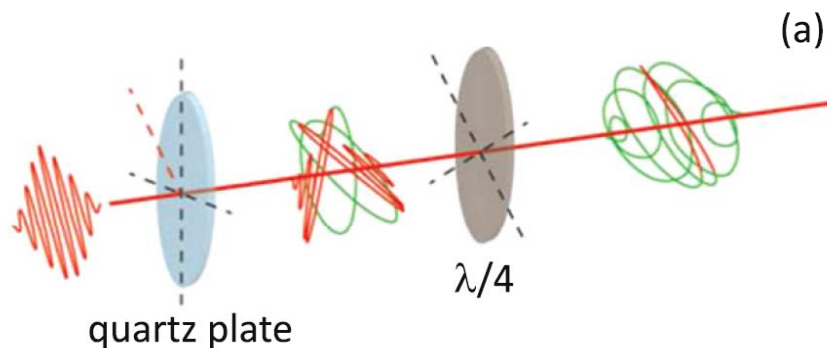
Плотность 4p оболочки как функция времени

# Способы ограничить импульсы во времени

Использовать «одиночный» затравочный импульс

Использовать поля с переменной во времени поляризацией

Модулировать затравочную частоту второй гармоникой



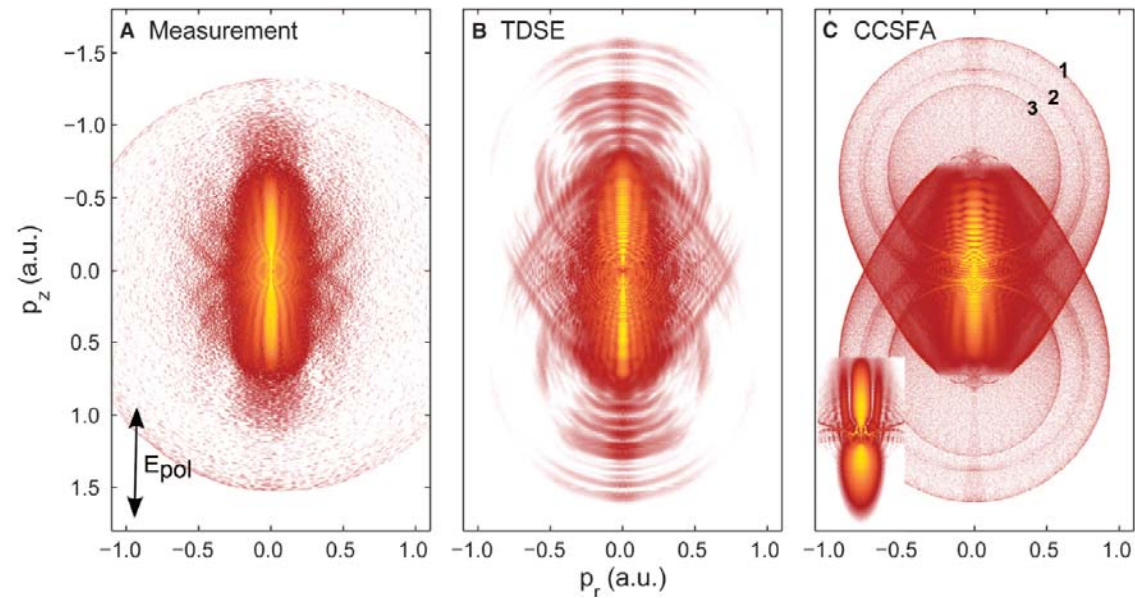
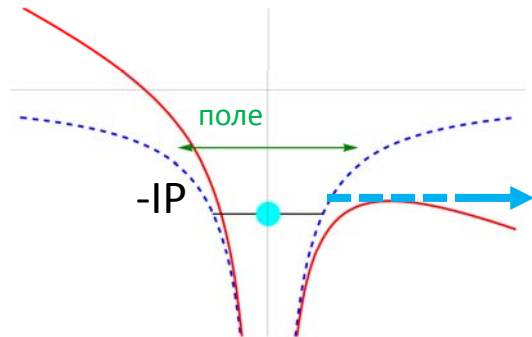
Advances in attosecond science

F. Calegari et al

J. Phys. B 49 062001 (2016)

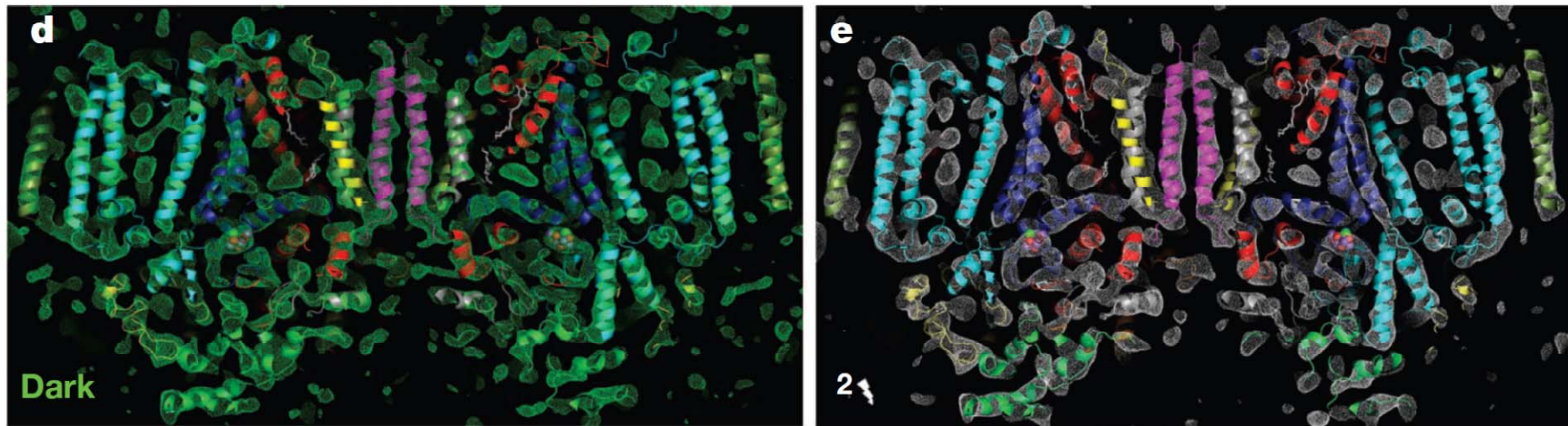


# Фотоэлектронная голография



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

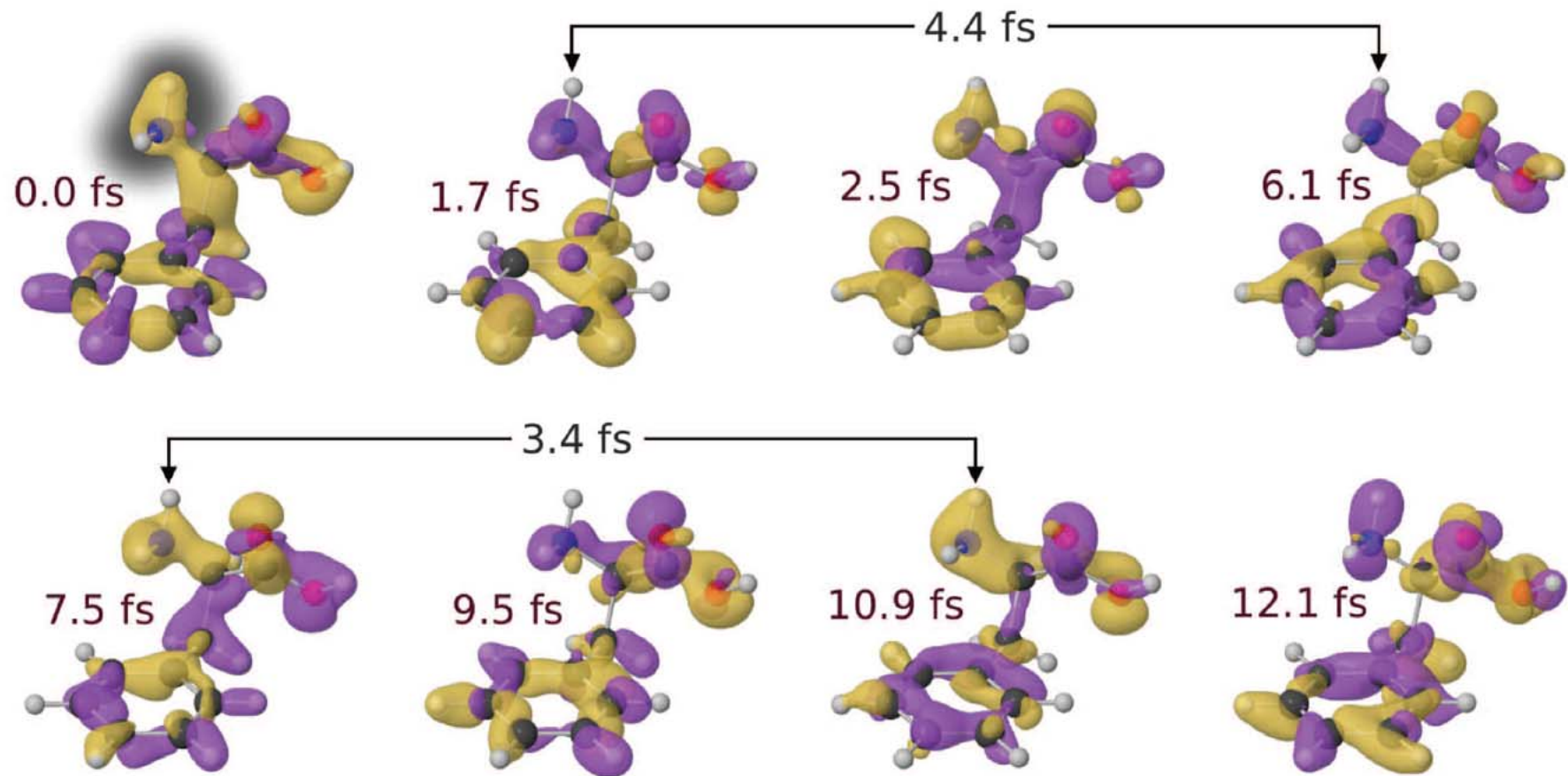
# Наблюдение фотосинтеза



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

Наблюдение биохимического процесса в режиме реального времени

# Трансфер заряда в атомах и молекулах



Ultrafast electron dynamics in phenylalanine initiated by attosecond pulses

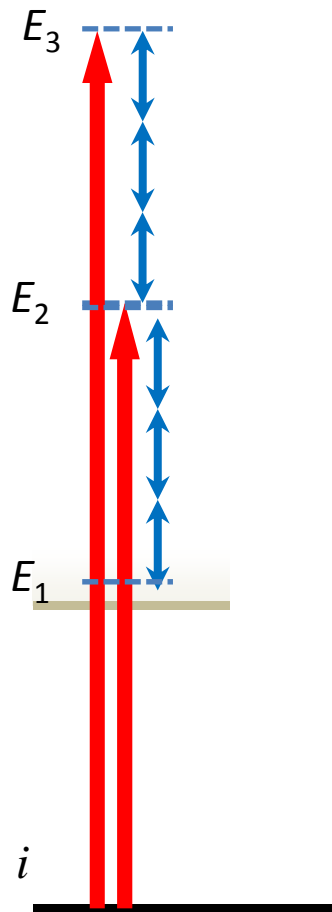
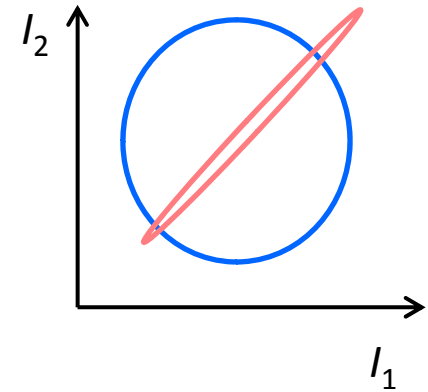
F. Calegari et al

Science **34** 336 (2014)

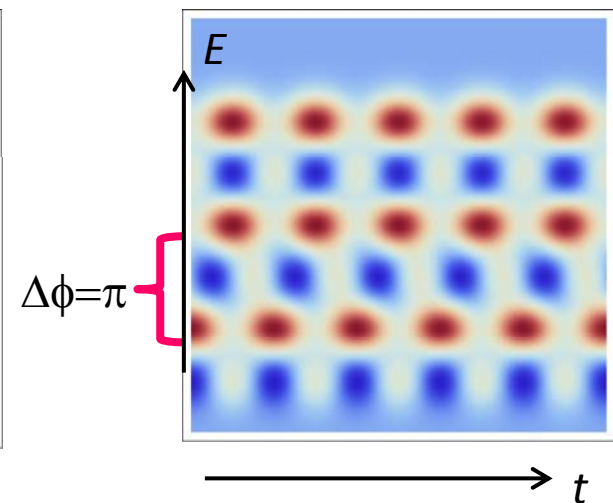
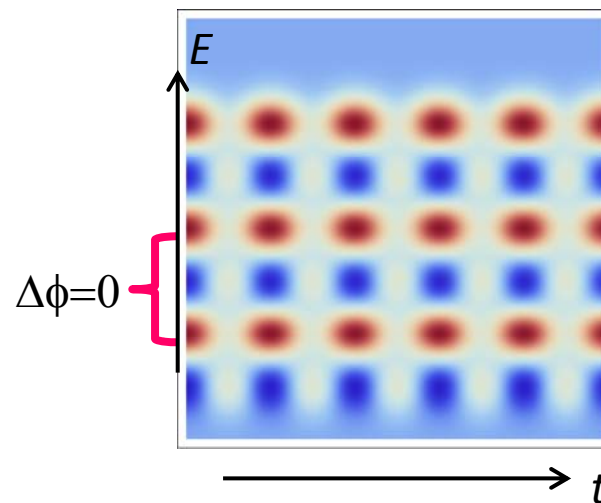
# Аттосекундная метрология в НИИЯФ МГУ

Attosecond pulse shaping using a seeded free-electron laser  
Nature, **578**, 386 (2020)

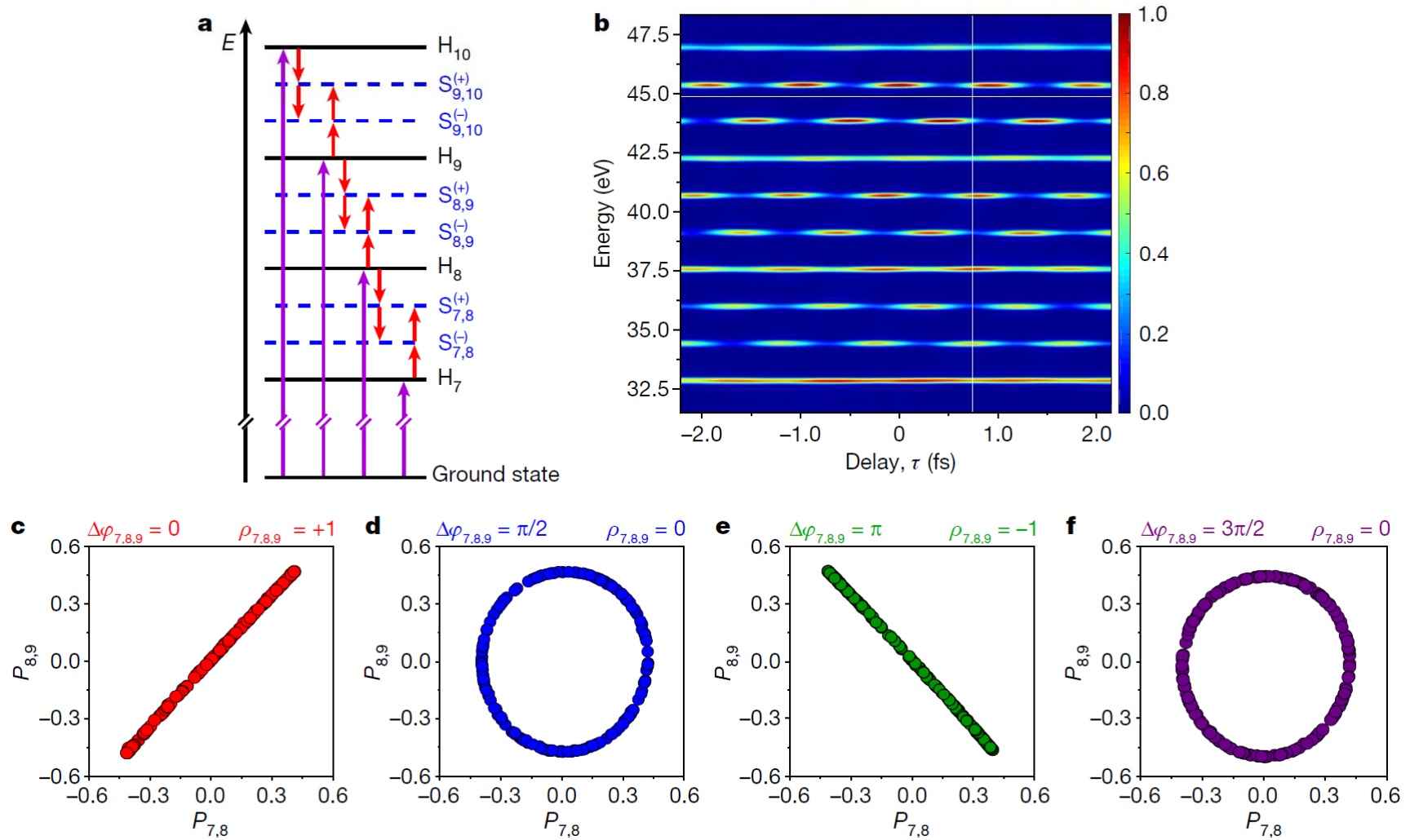
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2005-6>



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

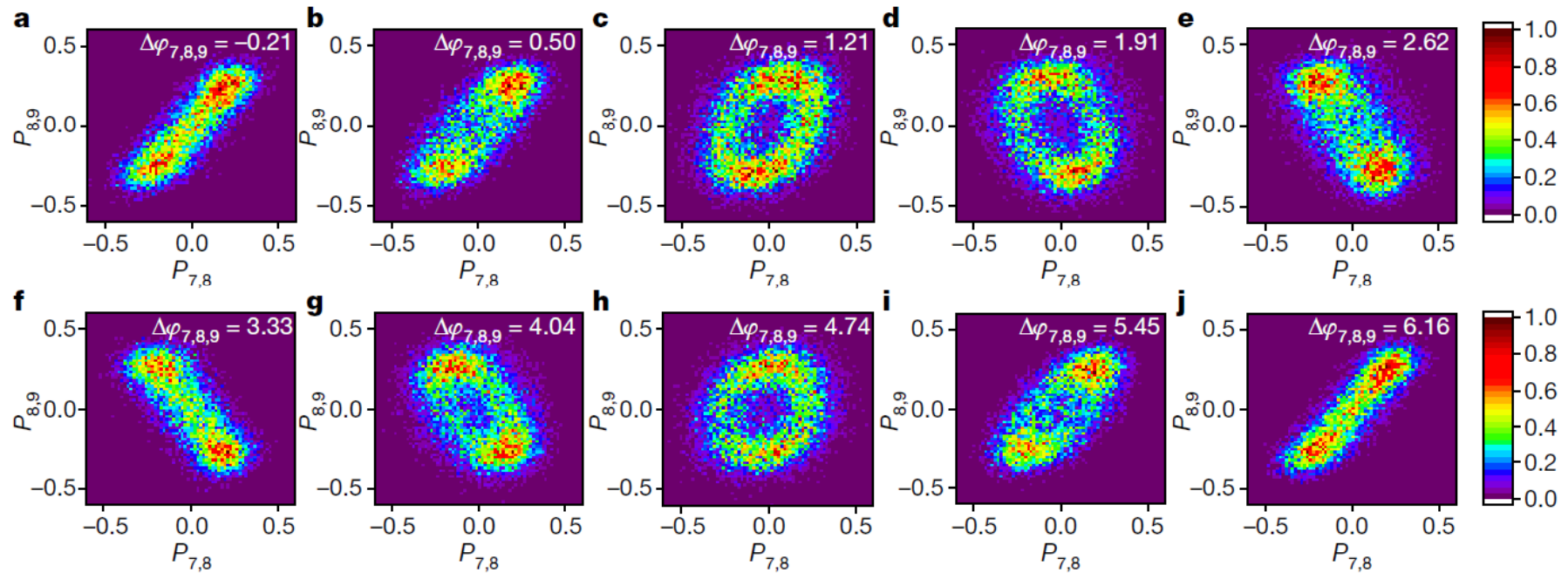


# Ионизация многочастотным полем ( $\delta=3\omega$ )





# 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

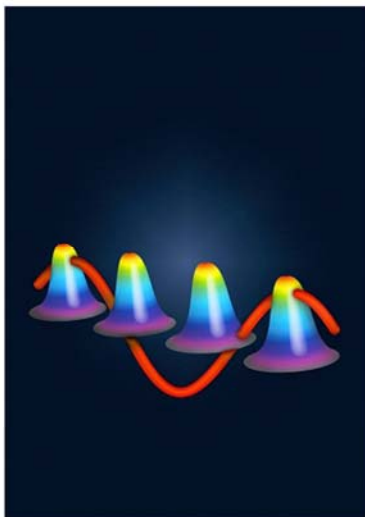
Для изучения очень быстрых процессов, подобных движению электронов в веществе, нужен инструмент, работающий на порядок быстрее. Движения электронов в атомах происходят за время порядка нескольких аттосекунд ( $1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$ ). Это время настолько мало, что свет за  $1 \text{ ас}$  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 пучков, 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 способ генерации аттосекундных импульсов лазером на свободных электронах и их диагностика. Статья опубликована в журнале Nature. Результаты работы могут быть использованы не только в рентгеновских лазерах на свободных электронах с временной когерентностью и открыв возможности для исследований в области структурной биологии, драг-дизайна и медицины.

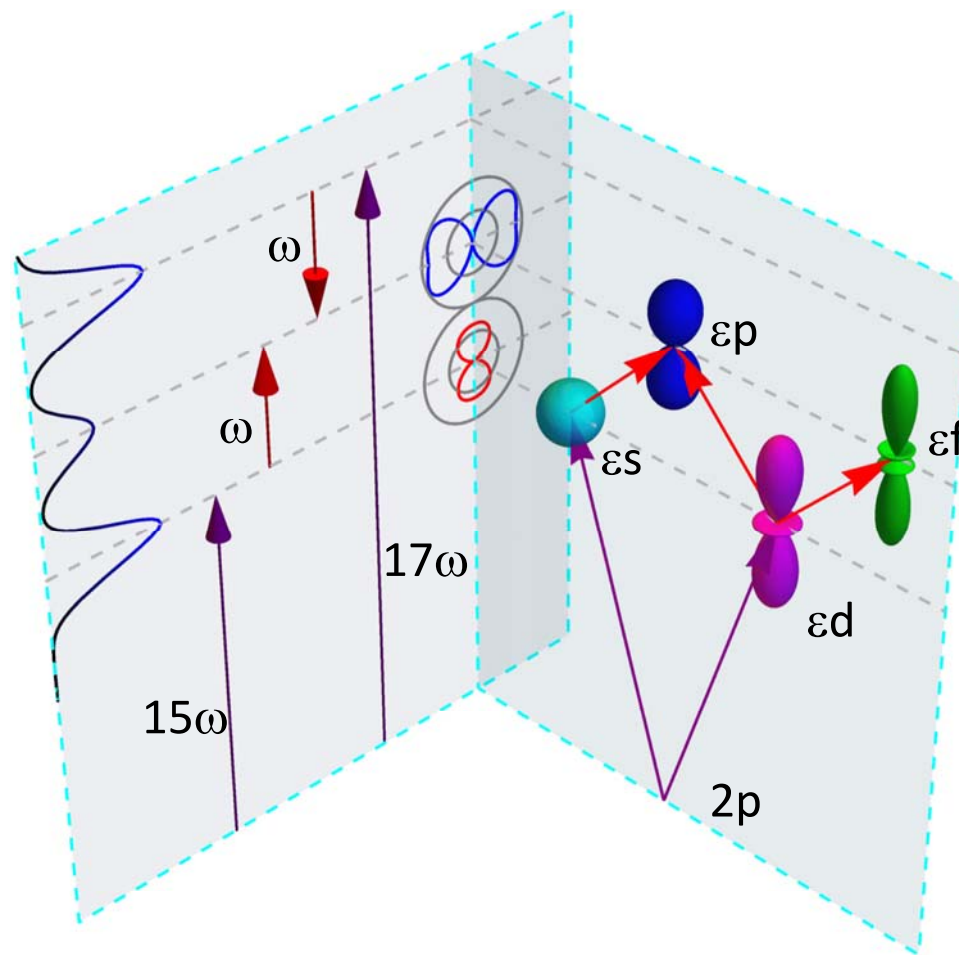
Для изучения динамики процесса во времени требуется инструмент, способный реагировать примерно на порядок скорее, чем собственно происходит процесс. Чем меньше длительность электромагнитных импульсов, тем более быстрые процессы можно с их помощью изучать и управлять ими. Аттосекундный масштаб характерен для движения электронов в атомах: за время, которое свет проходит расстояние, соответствующее типичному размеру атома, безинтенсивные 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 — актуальнейшая 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 учёных из нескольких стран на пока единственном в мире рентгеновском лазере на свободных электронах FERMI (Италия), обладающем временной когерентностью.

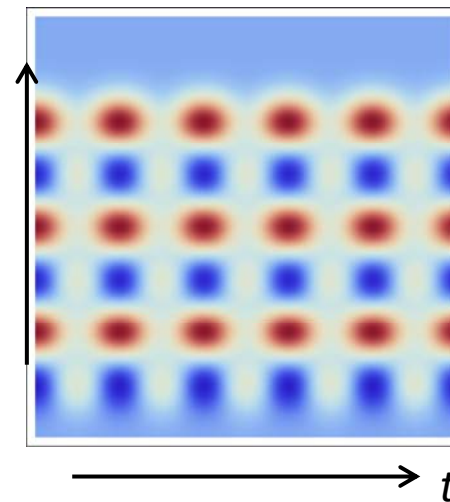
<https://www.msu.ru/press/smiaboutmsu/rentgenovskie-lazery-prorvalis-v-attosekundnyy-diapazon.html>

# RABBIT спектроскопия в угловых распределениях

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



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

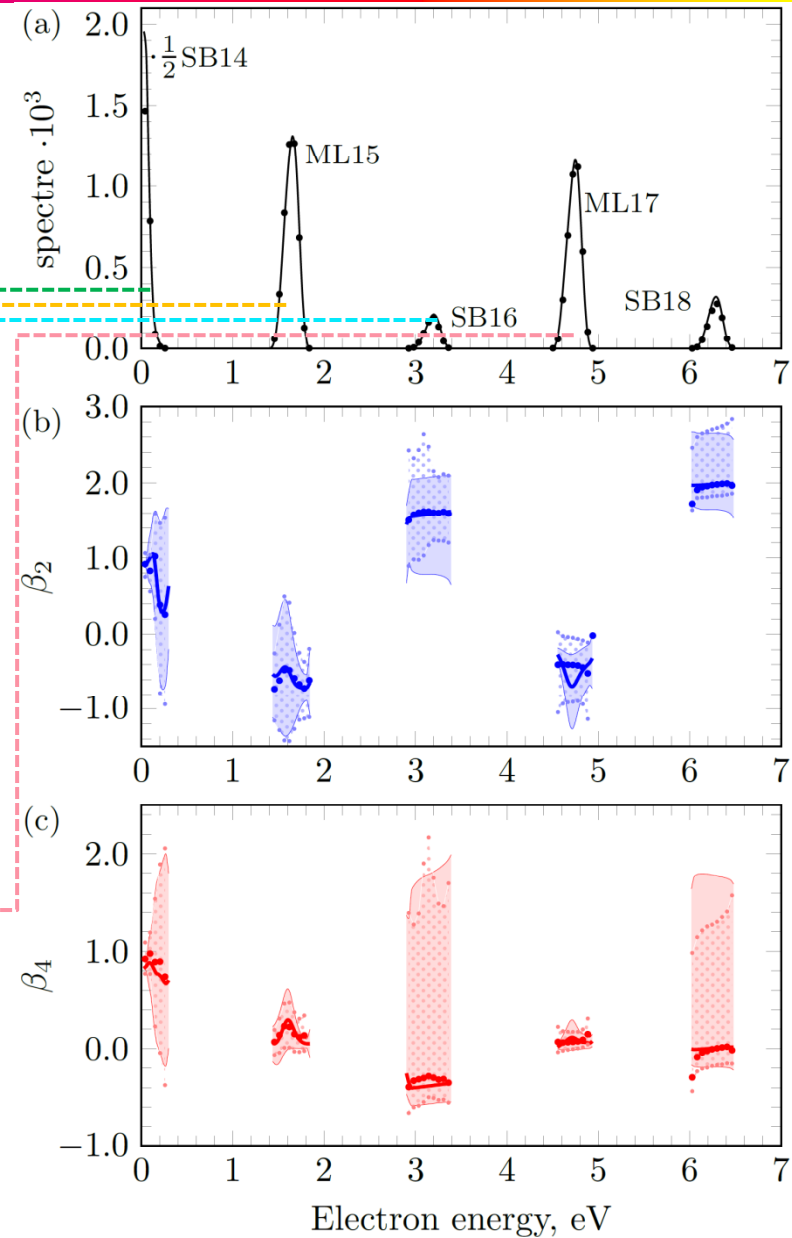
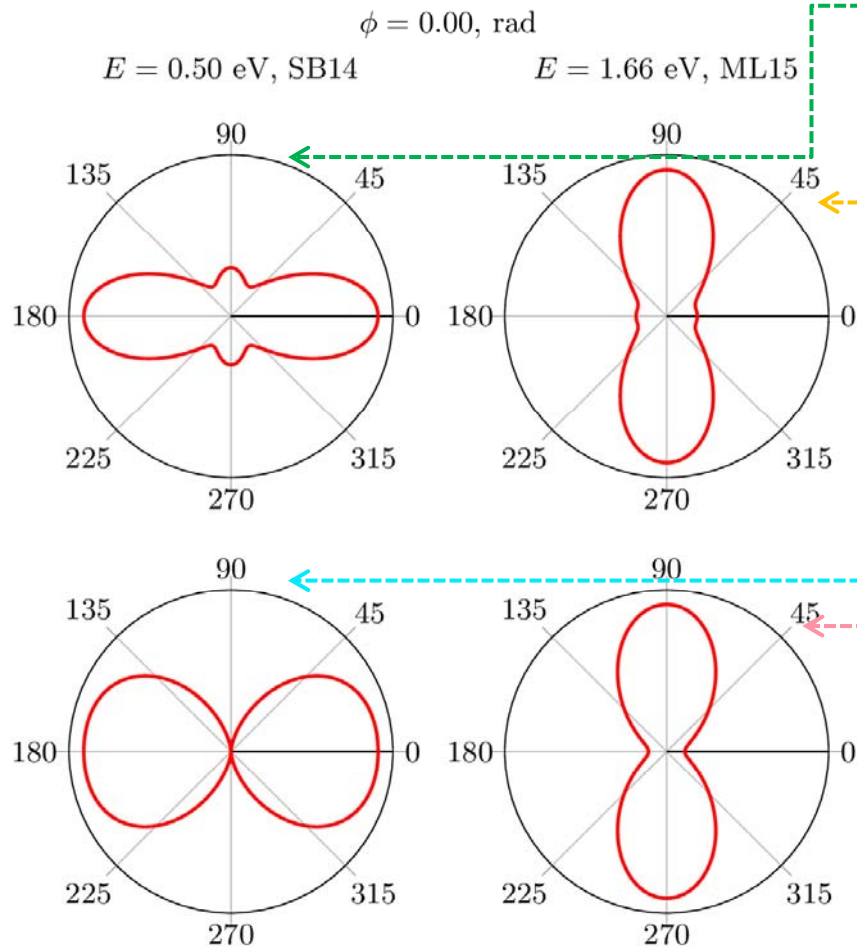


Изначально в RABBIT спектроскопии анализировали полную вероятность испускания электронов, но аналогичные осцилляции могут наблюдаться и в дифференциальных характеристиках, то есть угловых распределениях или ориентации спина

# Расчеты дифференциальных вероятностей

Вероятность электрона вылететь под определенным углом параметризуется

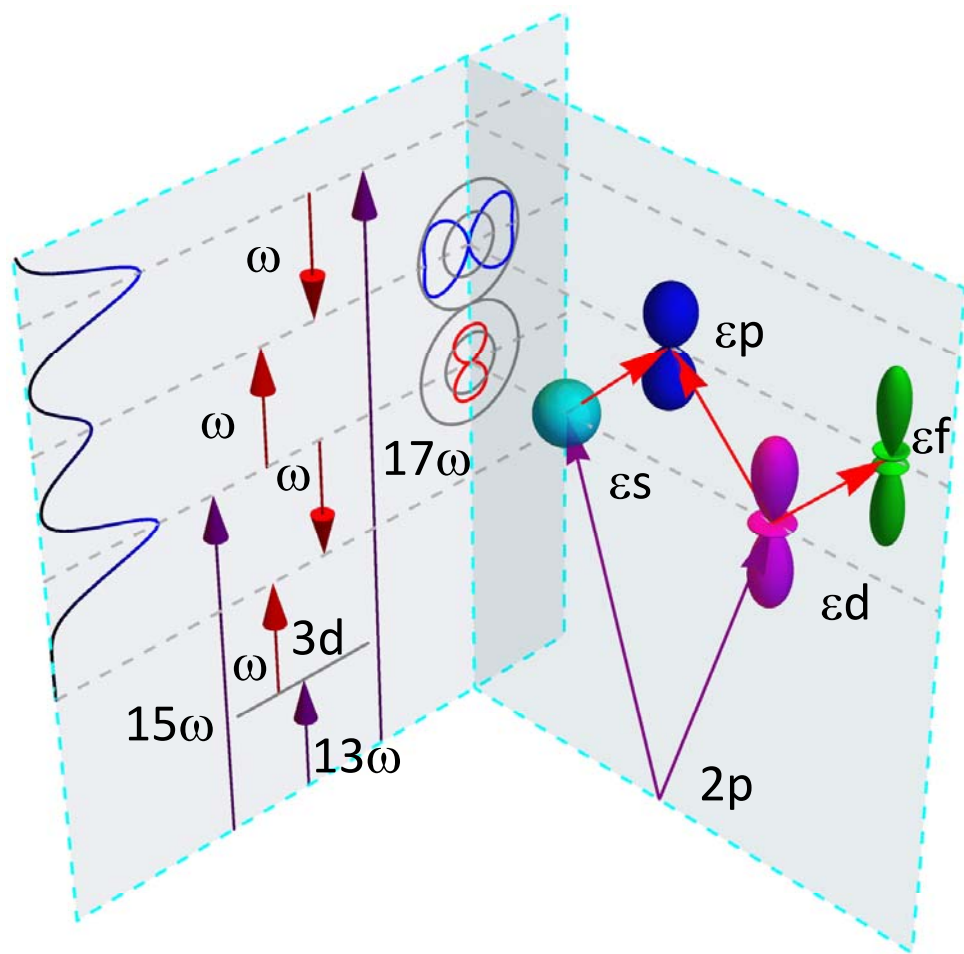
$$W(\theta) = W_0(1 + P_2(\cos \theta) + P_4(\cos \theta))$$



# RABBITT при участии дискретных состояний

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

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





## Заклучение

---



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**