

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие



Николай Борисович
Нарожный

06.11.1940 – 15.02.2016

Заведующий кафедрой
теоретической ядерной
физики НИЯУ МИФИ
в 1983-2016гг.

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие

1960-е годы

- аспирантура в МИФИ и ФИАН
- работы по элементарным квантовым процессам в сильных электромагнитных полях

*Квантовые процессы в поле циркулярно поляризованной электромагнитной волны
Н.Б. Нарожный, А.И. Никишов, В.И. Ритус
ЖЭТФ 47, 1964*

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие

1970-е годы

- ❑ кафедра общей физики МИФИ
- ❑ работа в группе проф. Эберли (университет Рочестера, США): Quantum collapse and revival

Joe Eberly:

“During the 18 months or so that he was here, along with my student Javier Sanchez-Mondragon, he was an excellent collaborator. We wrote two related papers that I just checked. They've been cited 1500 times between them, and are still steadily averaging 2-4 citations every month 35 years later! And on a topic (quantum revivals) that he never touched again.”

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие

1980-е годы

заведующий кафедрой теоретической ядерной физики МИФИ (1983-2016гг.)

1990-е годы

- теория пондеромотрного рассеяния в сильных фокусированных лазерных полях;
- описание экспериментов на SLAC по рождению e^+e^- пар высокоэнергетическим фотоном, взаимодействующим с мощным лазерным импульсом;

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие

1990-е годы

- теория пондеромотрного рассеяния в сильных фокусированных лазерных полях;
- описание экспериментов на SLAC по рождению e^+e^- пар высокоэнергетическим фотоном, взаимодействующим с мощным лазерным импульсом;
- эффект Унру:

Does the Unruh effect exist?

VA Belinskii, VM Karnakov, VD Mur, NB Narozhnyi

JETP Letters 65, 1997

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие

2000-2016

- ❑ участие в проектах ELI, IZEST, XCELS
- ❑ рождение e^+e^- пар сверхсильным лазерным полем из вакуума
- ❑ динамический эффект Казимира
- ❑ проблема критического заряда в КЭД
- ❑ квантовые каскады в сверхсильных полях
- ❑ принципиальное ограничение на максимально достижимую интенсивность лазерного поля

*Limitations on the attainable intensity of high power lasers
AM Fedotov, NB Narozhny, G Mourou, G Korn PRL 2010*

Николай Борисович Нарожный и его научное наследие

- ❑ Симпозиум Extreme Light Technologies, Science and Applications в рамках международной конференции Laser Physics
- ❑ Летняя школа НИЯУ МИФИ по теоретической физике
- ❑ I.Ya. Pomeranchuk and physics ant the turn of the century (2003); ICONO-2010; Международная школа по физике сверхмощных лазеров (ISUIL-2015)...

Школа 1988г.: ВТСП



В первом ряду в центре: А.С.Александров,
Н.А.Черноплеков, Л.П.Горьков, Ю.М.Каган,
Н.Б.Нарожный, А.И.Руденко

Школа 1991г.: Взаимодействие лазерного излучения с веществом



Школа 2006г.: Первая международная школа



Школа 2010г.



Школа 2010г.



Школа 2010г.



Школа 2010г.



Школа 2012г.

- **Alexandr Belavin**, Landau Institute for Theoretical Physics
- **Mikhail Vysotsky**, Institute for Theoretical and Experimental Physics
- **Grigory Volovik**, Landau Institute for Theoretical Physics
- **Arkady Galper**, MEPHI
- **Mikhail Danilov**, Institute for Theoretical and Experimental Physics
- **Sergey Garanin**, Institute for Laser Physics, VNIIEF
- **Hartmut Ruhl**, University of München
- **Alexey Starobinsky**, Landau Institute for Theoretical Physics
- **Alexandr Sergeev**, Applied Physics Institute
- **Valery Bychenkov**, Lebedev Physics Institute
- **Pietro Fre**, University of Torino
- **Yuri Lozovik**, Institute for Spectroscopy
- **Yuri Makhlin**, Landau Institute for Theoretical Physics



Николай Борисович
Нарожный

06.11.1940 – 15.02.2016

Заведующий кафедрой
теоретической ядерной
физики НИЯУ МИФИ
в 1983-2016гг.

Метод мнимого времени в физике сильных лазерных полей

С.В. Попруженко

НИЯУ МИФИ, Москва

**«Нелинейные Волны – 2016»
Нижний Новгород, 27.02 – 04.03.2016**

Содержание

I. Метод

- ❑ Нелинейная квантовая динамика в сильном внешнем поле.
- ❑ Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением.
- ❑ Метод мнимого времени.
- ❑ Мнимое время и комплексные траектории.

Содержание

I. Метод

II. Приложения

- ❑ Ионизация в поле рентгеновских лазеров
- ❑ «Кулоновские» траектории
- ❑ Время туннелирования и туннельный барьер – измеряемы ли эти величины
- ❑ Рождение пар из вакуума сверхсильным электромагнитным полем.

Нелинейная квантовая динамика в сильном внешнем поле

$$H(t) = H_0 + V(t)$$

$$H_0 \rightarrow F_{\text{ch}}$$

$$V \rightarrow F_0 = \varepsilon F_{\text{ch}}, \quad \varepsilon \ll 1$$

Нелинейная квантовая динамика в интенсивном лазерном поле

$$E_{cr} = \frac{mc^2}{e\lambda_c} = \frac{m^2 c^3}{e\hbar} \approx 10^{16} \text{ V/cm}$$

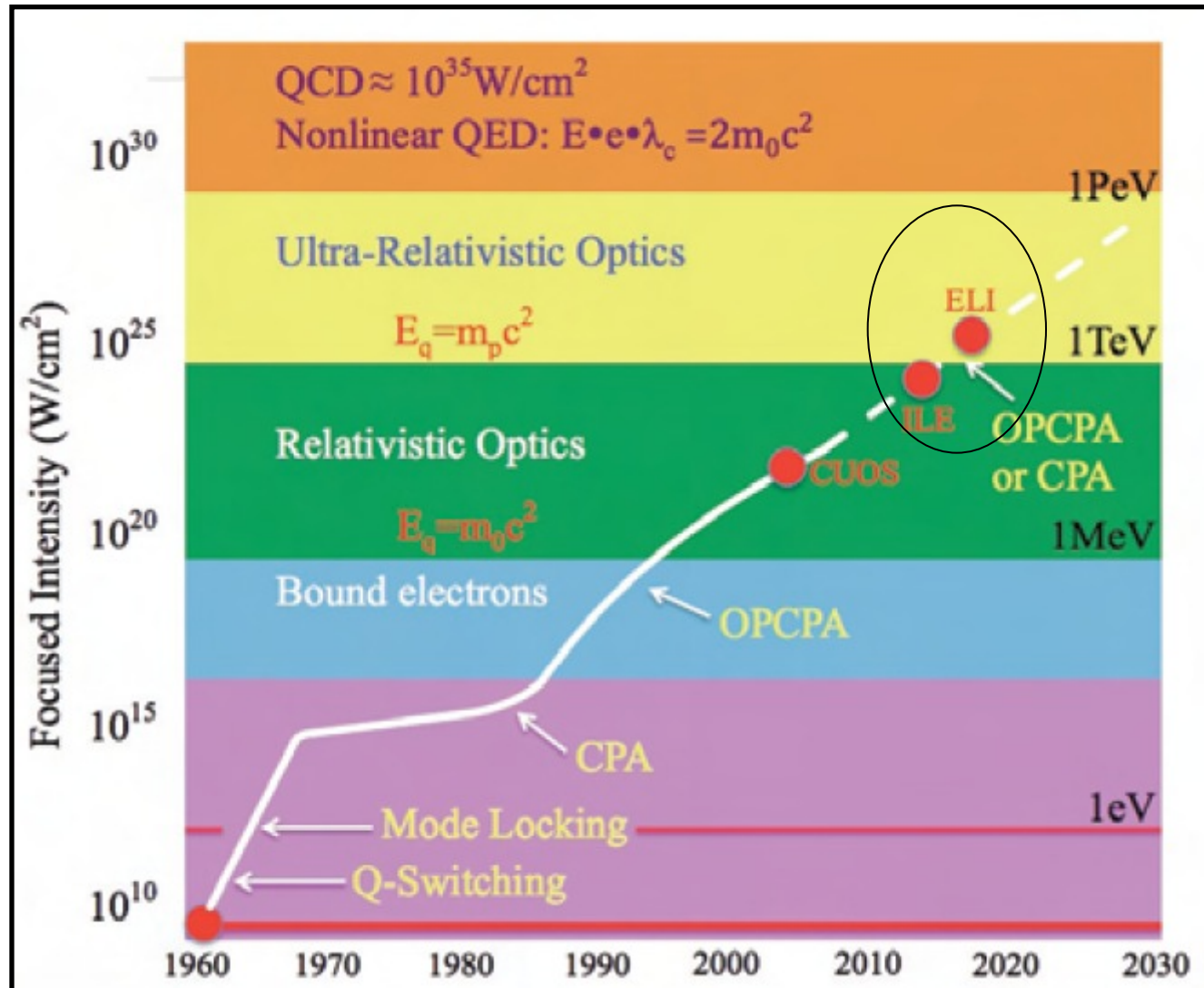


$$I \approx 10^{29} \text{ W/cm}^2$$

$$\hbar\omega \approx m_e c^2$$



$$\lambda \approx \lambda_c \approx 10^{-11} \text{ cm}$$



Нелинейная квантовая динамика в интенсивном лазерном поле

$$E_{at} = \frac{e}{a_B^2} = \frac{m^2 e^5}{\hbar^4}$$

$$\approx 5 \cdot 10^9 \text{ V/cm}$$

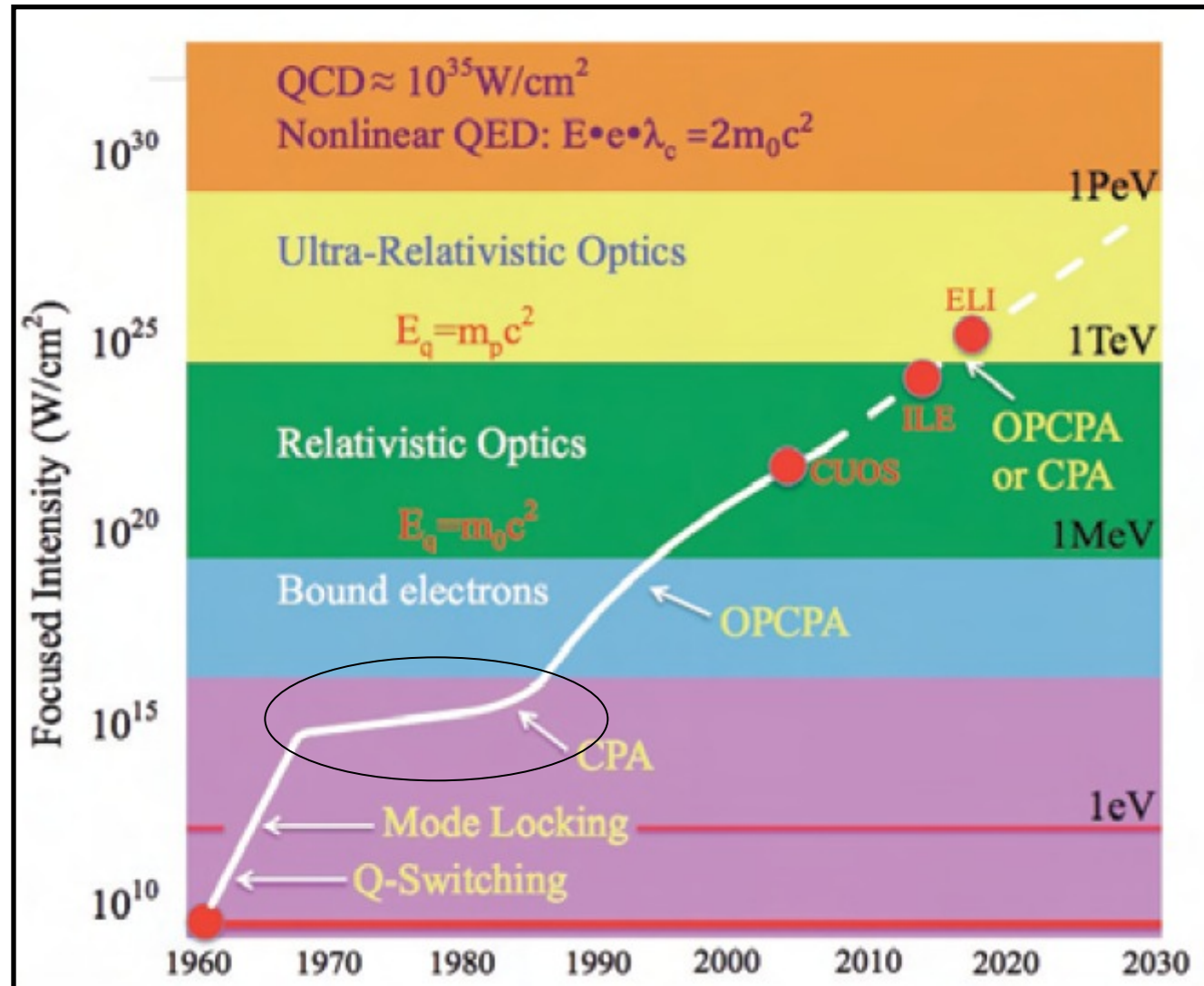
↕

$$I_{at} \approx 10^{16} \text{ W/cm}^2$$

$$\hbar\omega \approx \frac{me^4}{\hbar^2}$$

↕

$$\lambda \approx 10^{-5} \text{ cm}$$



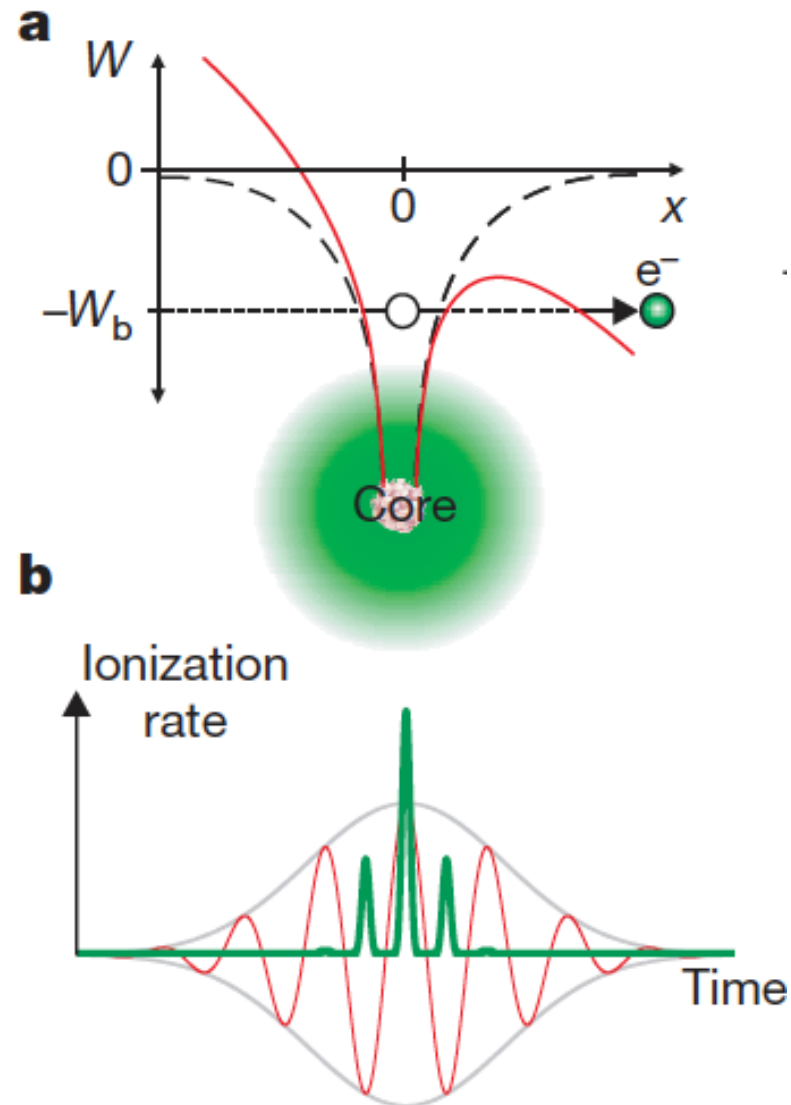
Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением

$$H(t) = H_0 + V(t)$$

$$H_0 = \sum_n^N \frac{\mathbf{p}_n^2}{2m_n} + U(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)$$

$$V(t) = -\mathbf{F}(t) \cdot \sum_n^N \mathbf{r}_n$$

$$\mathbf{F}(t) = -e\mathbf{E}_0 f(t) \cos(\omega t)$$



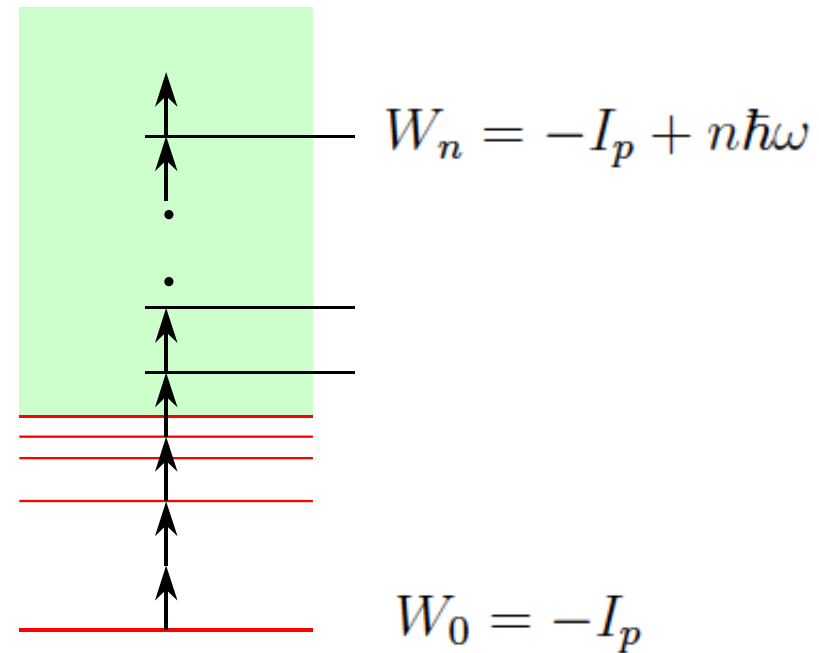
Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением

$$H(t) = H_0 + V(t)$$

$$H_0 = \sum_n^N \frac{\mathbf{p}_n^2}{2m_n} + U(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)$$

$$V(t) = -\mathbf{F}(t) \cdot \sum_n^N \mathbf{r}_n$$

$$\mathbf{F}(t) = -e\mathbf{E}_0 f(t) \cos(\omega t)$$



Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением

$$E_{at} = \frac{e}{a_B^2} = \frac{m^2 e^5}{\hbar^4} \approx 5 \cdot 10^9 \text{ V / cm} \quad \Leftrightarrow \quad J_{at} \cong 10^{16} \text{ W / cm}^2$$

$$\hbar\omega \cong \frac{me^4}{\hbar^2} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda \cong 10^{-5} \text{ cm}$$

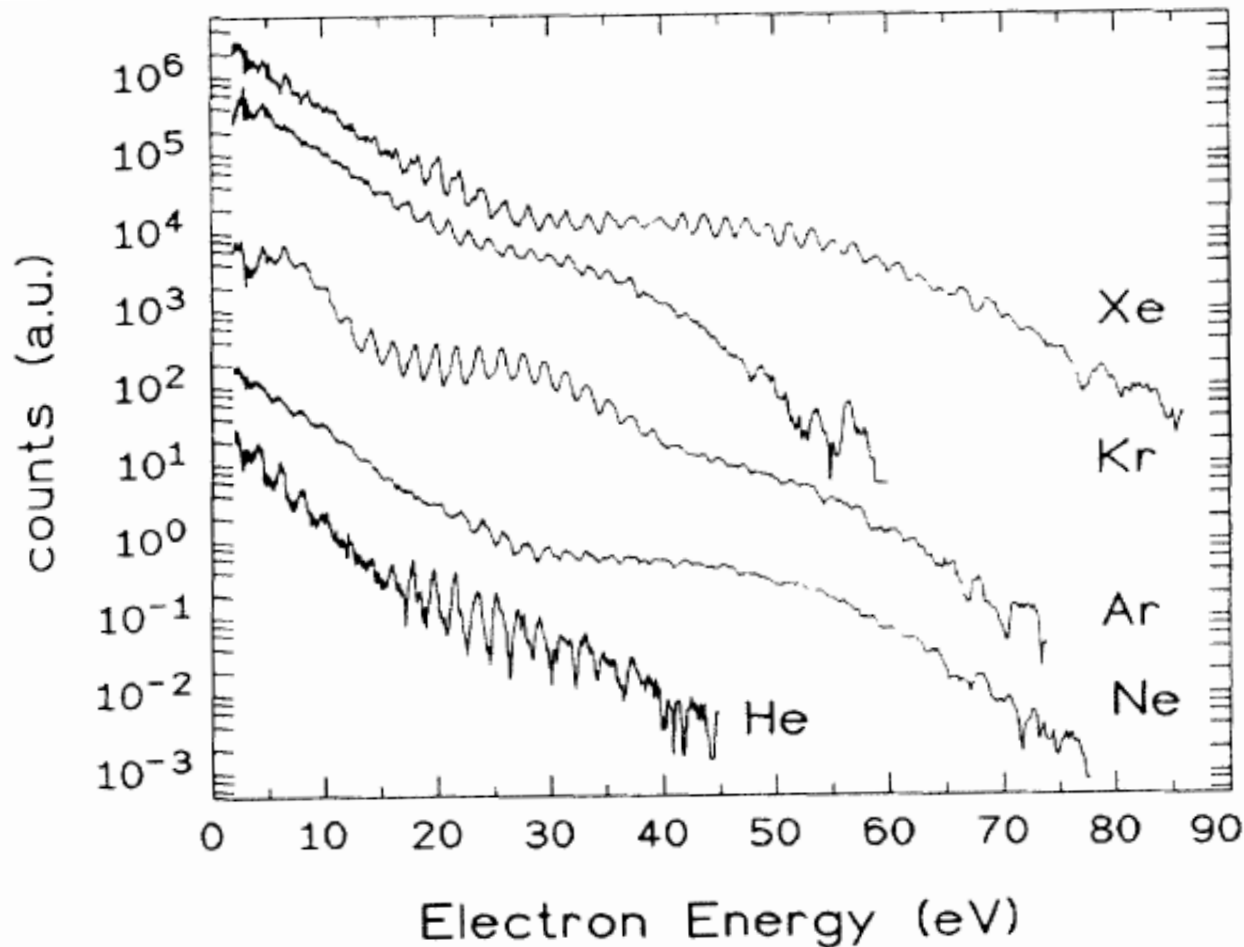
Параметр многоквантовости

$$K_0 = \frac{I_p}{\hbar\omega} \gg 1$$

Пондеромоторная энергия

$$U_P = \frac{e^2 E_0^2}{4m\omega^2} \gg \hbar\omega$$

Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением



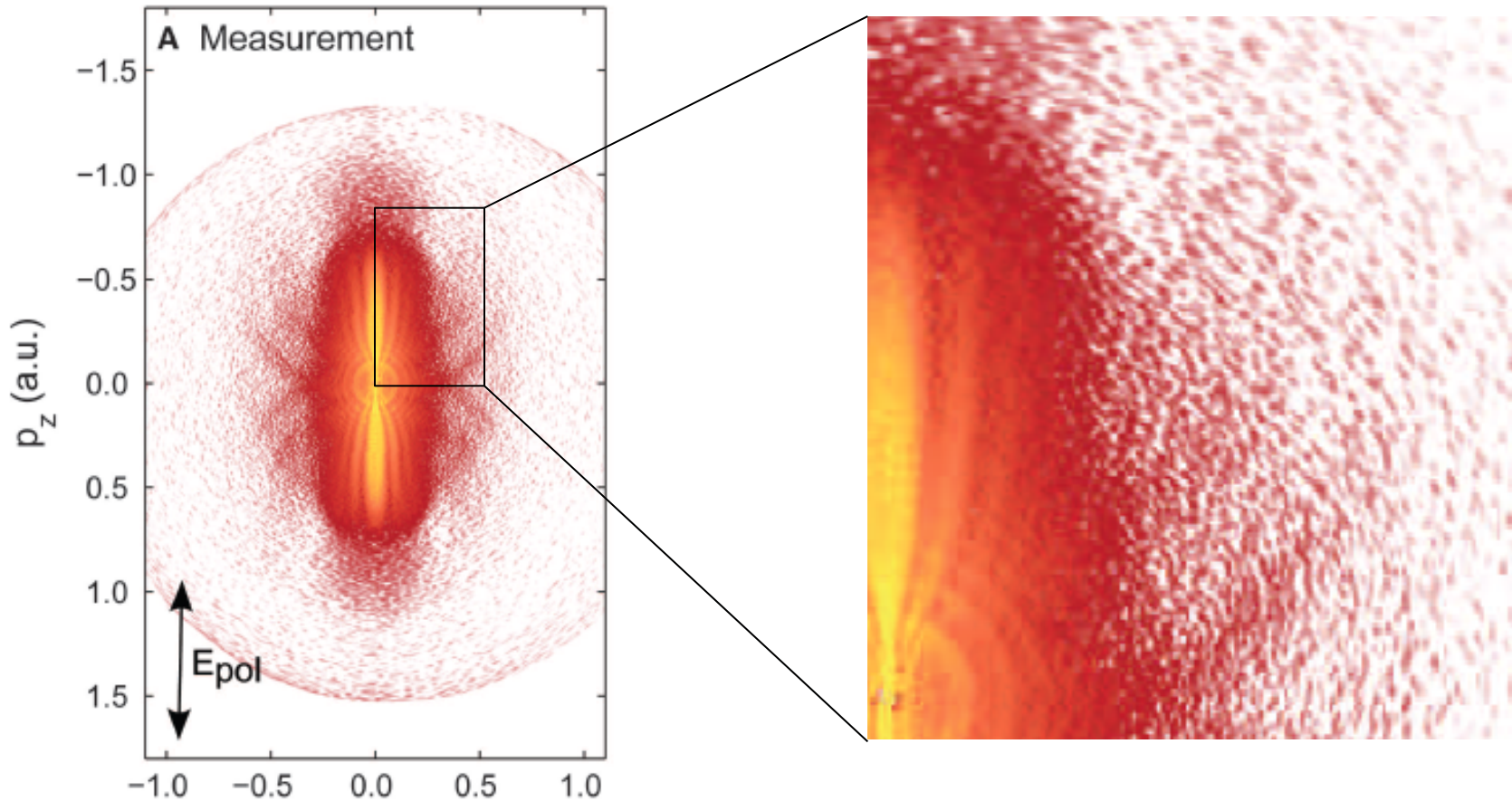
$$\lambda = 800\text{nm}$$

$$J \simeq 10^{14}\text{W/cm}^2$$

$$\varepsilon \equiv F = \frac{E_0}{E_{\text{ch}}} \approx 0.1$$

G.G. Paulus et al., PRL 1994

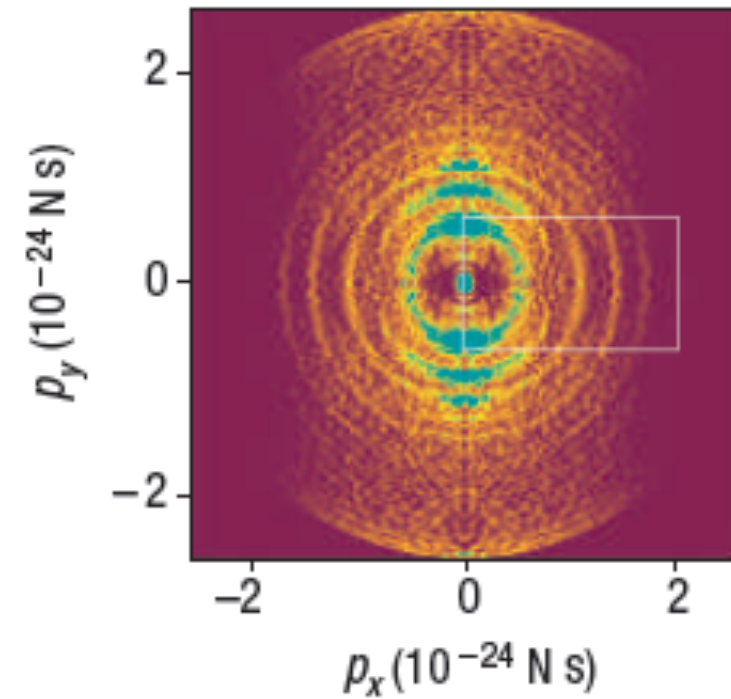
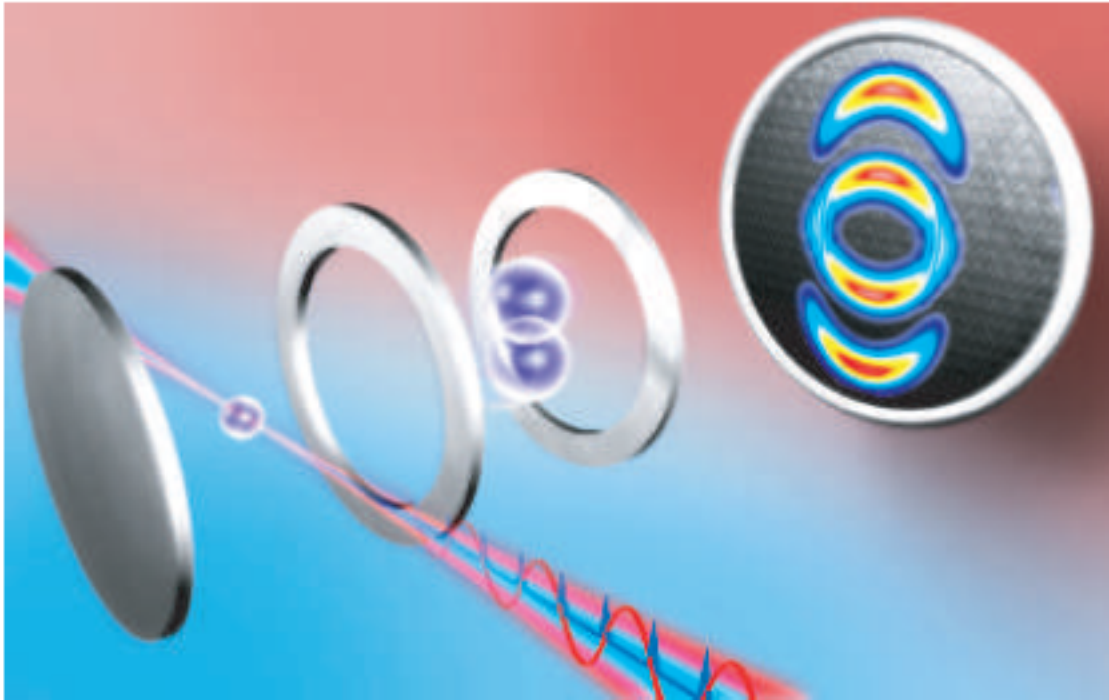
Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением



Ionization of metastable Xe 6s by a $7\mu\text{m}$ $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ from the FELICE source

Y. Huisman et al., Science 2011

Ионизация атомов интенсивным лазерным излучением: velocity map imaging



Теория Келдыша

Л.В. Келдыш:

Ионизация в поле сильной электромагнитной волны,
ЖЭТФ, 1964

Юбилейный выпуск ЖЭТФ, март (3) 2016г.

$$M(\mathbf{p}) = -\frac{i}{\hbar} \int_0^T dt \langle \Psi_{\mathbf{p}} | V(t) | \Psi_0 \rangle$$

$$\Psi_0 = \phi(\mathbf{r}) e^{iI_{\mathbf{p}}t/\hbar} \quad m\mathbf{v}_{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{p} + \mathbf{A}(t) \quad \mathbf{F}(t) = -\dot{\mathbf{A}}(t)$$

$$\Psi_{\mathbf{p}} = \frac{1}{(2\pi\hbar)^{3/2}} \exp \left\{ i \frac{\mathbf{v}_{\mathbf{p}}(t) \cdot \mathbf{r}}{\hbar} - \frac{im}{2\hbar} \int_0^t \mathbf{v}_{\mathbf{p}}^2(t') dt' \right\}$$

Метод стационарной фазы

$$M(\mathbf{p}) \sim \int_0^T dt \exp \left\{ iI_p t + \frac{i}{2} \int_0^t (\mathbf{p} + \mathbf{A}(t'))^2 dt' \right\} = \int_0^T dt \exp \left\{ iW_0(t) \right\}$$

$$\frac{\partial W_0}{\partial t} = 0 \quad (\mathbf{p} + \mathbf{A}(t_s))^2 + 2I_p = 0$$

$$M(\mathbf{p}) \sim \sum_{\alpha} \exp \left\{ iW_0(\mathbf{p}, t_{s\alpha}) \right\}$$

$$m = e = \hbar = 1$$

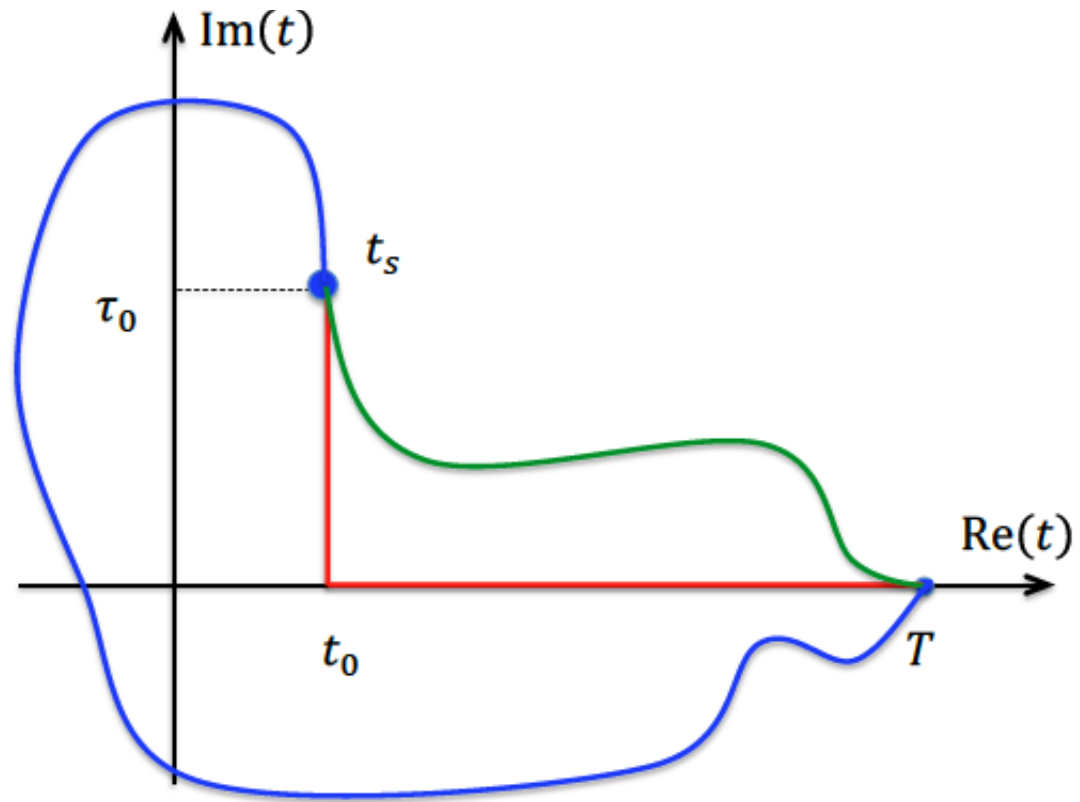
Метод мнимого времени

$$(\mathbf{p} + \mathbf{A}(t_s))^2 + 2I_p \equiv \mathbf{v}_p^2(t_s) + 2I_p = 0$$

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_L(t)$$

$$\mathbf{r}(t_s) = 0$$

$$\mathbf{v}_p(T) = \mathbf{p}$$

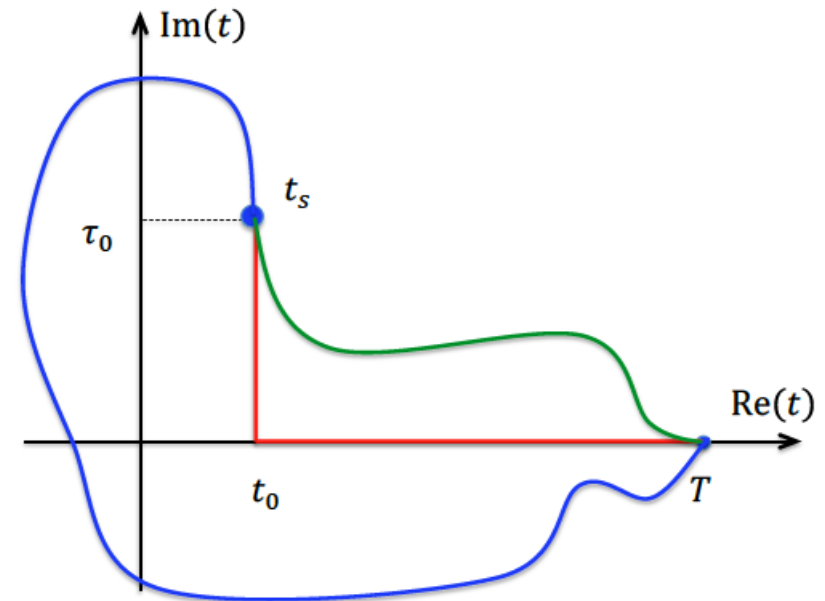


$$\mathbf{r}_0(\mathbf{p}, t) = \mathbf{p}(t - t_s) + \int_{t_s}^t \mathbf{A}(t') dt'$$

Метод мнимого времени

$$W_0 = \int_{t_s}^T (L_0 - I_p) dt - \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{r}_0 \Big|_{t_s}^T$$

$$L_0 = \frac{1}{2} \mathbf{v}_p^2 + \mathbf{F}_L \cdot \mathbf{r}_0$$



$$M(\mathbf{p}) \sim \sum_{\alpha} \exp \left\{ iW_0[\mathbf{r}_0(\mathbf{p}, T, t_{s\alpha})] \right\}$$

А.М. Переломов, В.С. Попов, М.В. Терентьев, 1966

Метод мнимого времени: зачем это нужно?

$$M(\mathbf{p}) = -i \int_0^T dt \langle \Psi_{\mathbf{p}} | V(t) | \Psi_0 \rangle$$

$$M(\mathbf{p}) \sim \sum_{\alpha} \exp \left\{ iW_0(\mathbf{p}, t_{s\alpha}) \right\}$$

$$M(\mathbf{p}) \sim \sum_{\alpha} \exp \left\{ iW_0[\mathbf{r}_0(\mathbf{p}, T, t_{s\alpha})] \right\}$$

Метод мнимого времени: зачем это нужно?

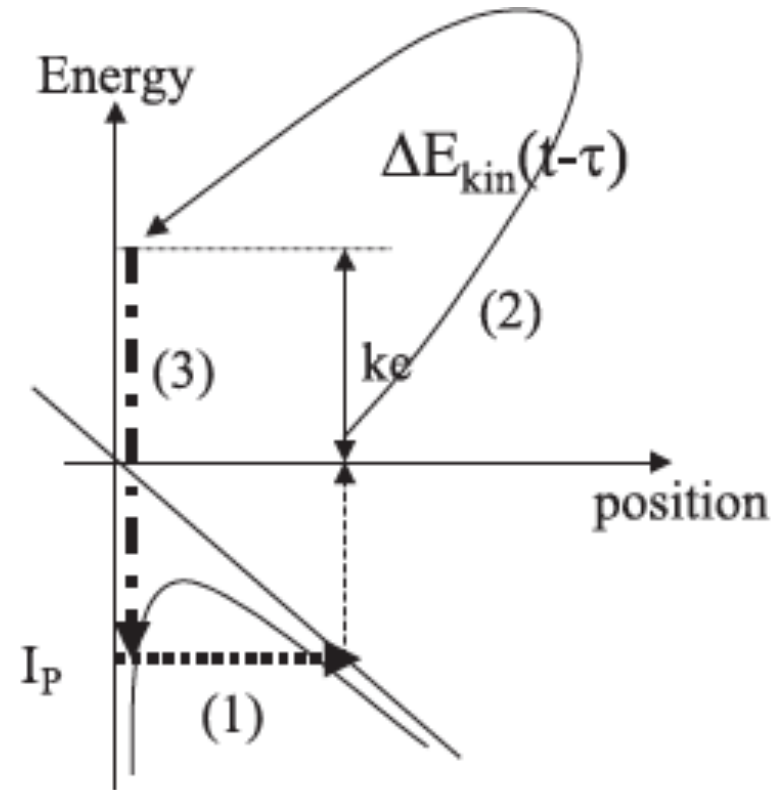
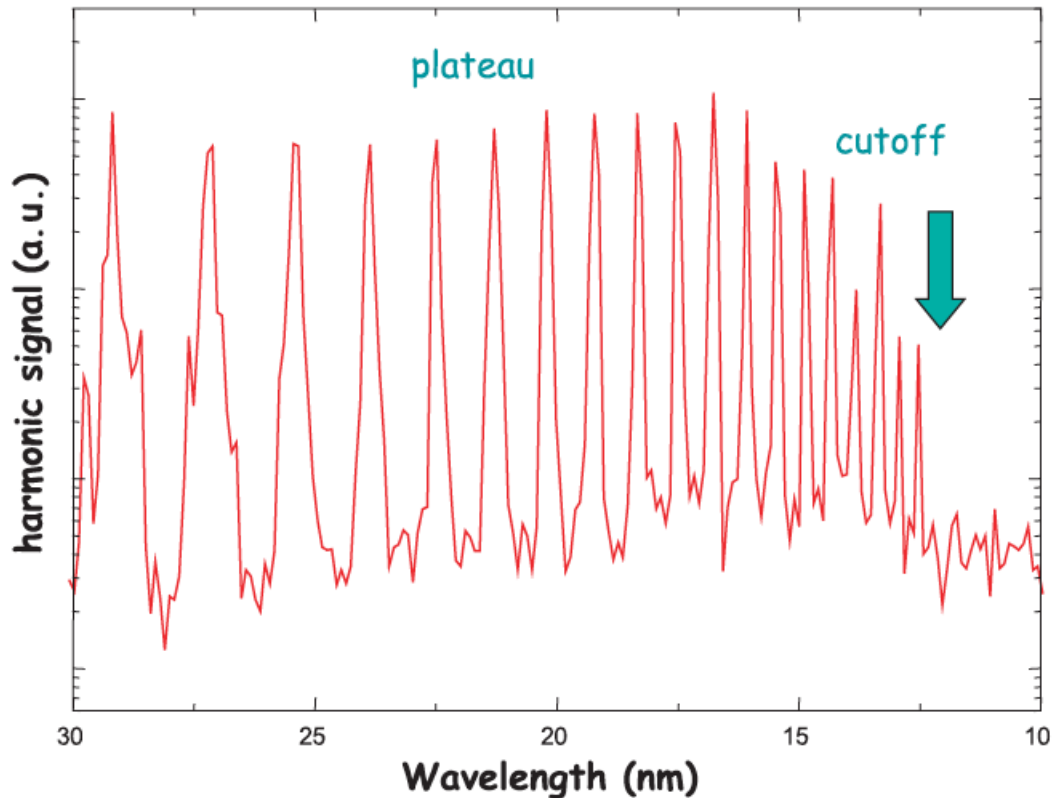
- ❑ ММВ как инструмент предсказания новых эффектов
- ❑ ММВ позволяет существенно уточнить приближение Келдыша в теории нелинейной ионизации, генерации гармоник, etc.

Метод мнимого времени: предсказание новых эффектов

Атомная антенна и генерация
высоких гармоник

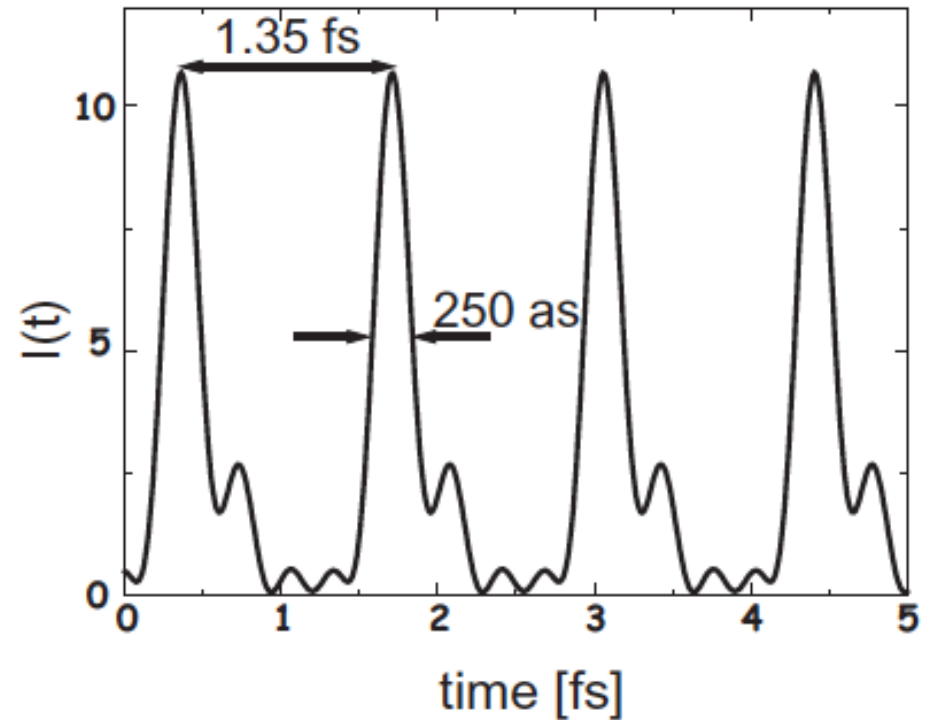
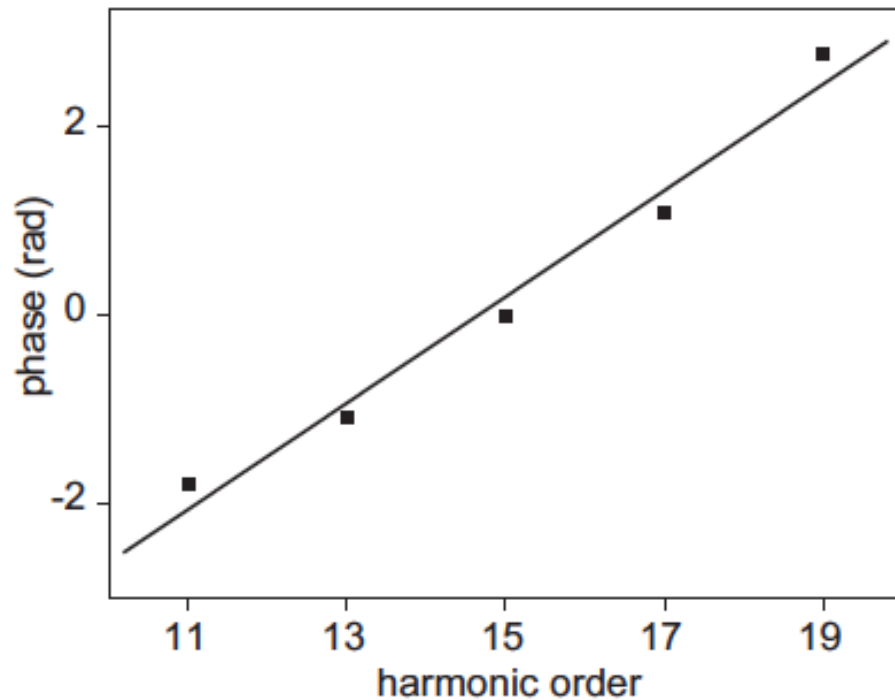
М.Ю. Kuchiev, 1987

Р.В. Corkum, 1993



Метод мнимого времени: предсказание новых эффектов

Аттосекундная физика

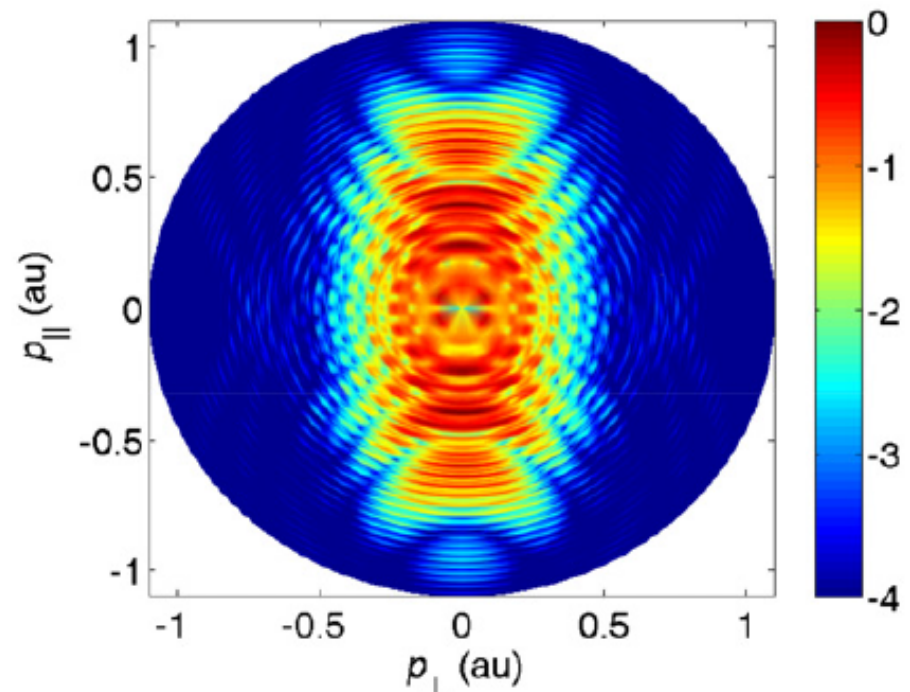
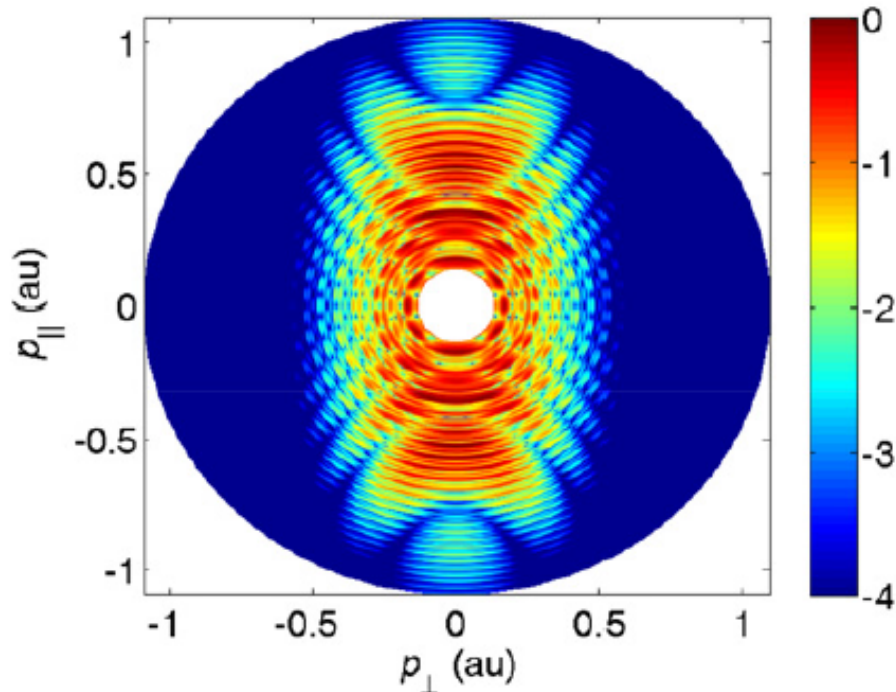


P. Agostini, L. Di Mauro, Rep. Prog. Phys. 2004

Метод мнимого времени: учет кулоновского взаимодействия

$$i\partial_t\Psi = (H_0 + V(t))\Psi$$

$$M(\mathbf{p}) = -i \int_0^T dt \langle \Psi_{\mathbf{p}} | V(t) | \Psi_0 \rangle$$

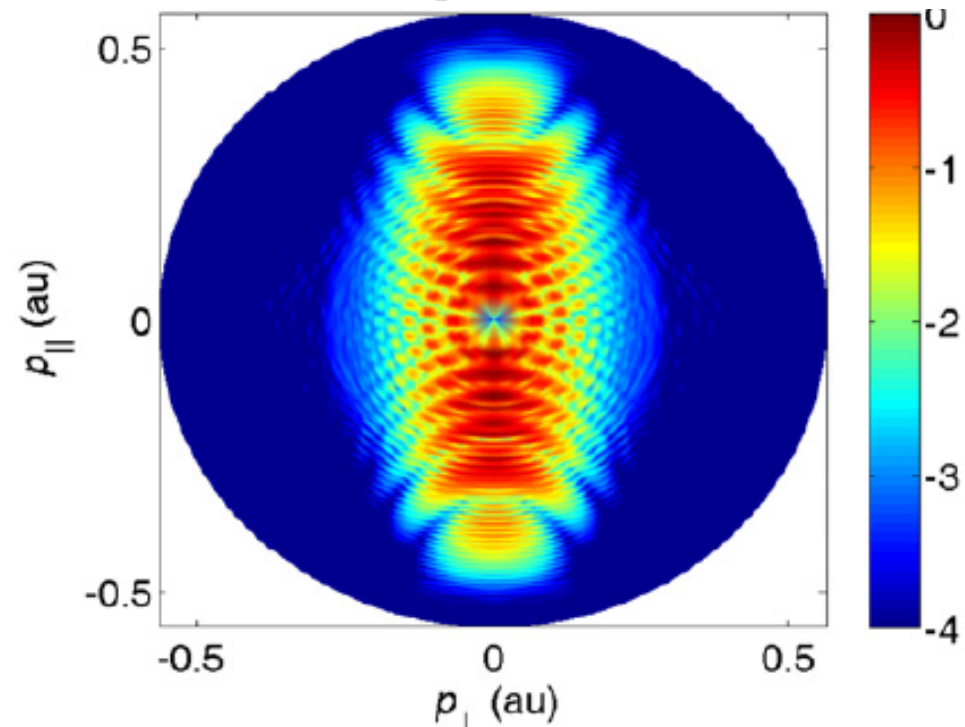
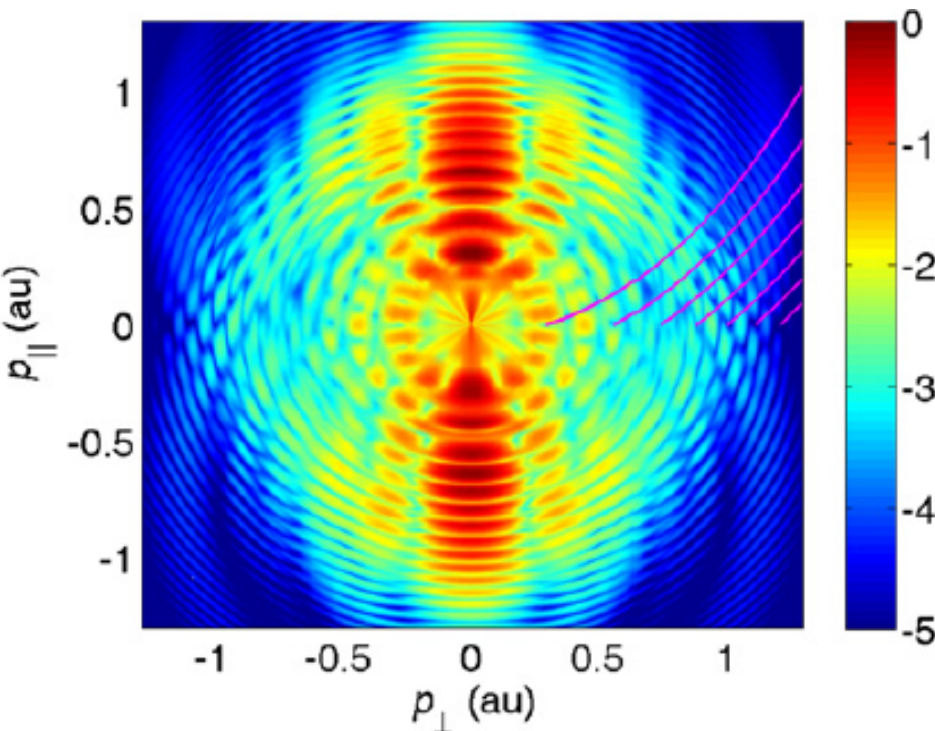


Импульсные распределения фотоэлектронов при ионизации F⁻ излучением с длиной волны 1800нм и интенсивностью 10^{13} Вт/см²: численное решение TDSE (слева) и приближение Келдыша (справа)

Метод мнимого времени: учет кулоновского взаимодействия

$$i\partial_t\Psi = (H_0 + V(t))\Psi$$

$$M(\mathbf{p}) = -i \int_0^T dt \langle \Psi_{\mathbf{p}} | V(t) | \Psi_0 \rangle$$



Импульсные распределения фотоэлектронов при ионизации H излучением с длиной волны 800нм и интенсивностью 10^{14} Вт/см²: точное решение (слева) и приближение Келдыша (справа)

Метод мнимого времени:

учет кулоновского взаимодействия

$$\ddot{\mathbf{r}}_0 = \mathbf{F}_L(t) \quad \rightarrow \quad \ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}_L(t) - \frac{Z\mathbf{r}}{r^3}$$

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_0(t) + \mathbf{r}_1(t) + \dots \quad \mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_p(t) + \mathbf{v}_1 + \dots$$

$$W = W_0 + W_{C1} + W_{C2}$$

$$W_{C1} = - \int_{t_s}^T U_C[\mathbf{r}_0(t)] dt = Z \int_{t_s}^T \frac{dt}{r_0(t)}$$

$$W_{C2} = \int_{t_s}^T [L_0(\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_1) - L_0(\mathbf{r}_0)] dt$$

Метод мнимого времени: учет кулоновского взаимодействия

$$\tilde{M}_\alpha(\mathbf{p}) \sim \exp \left\{ i[W_{0\alpha} + W_{C1\alpha} + W_{C2\alpha}] \right\} \equiv Q_{1\alpha} \cdot Q_{2\alpha} \cdot M(\mathbf{p})_\alpha$$

Переломов, Попов 1967; Bauer, Мур, Попов, СВП 2008

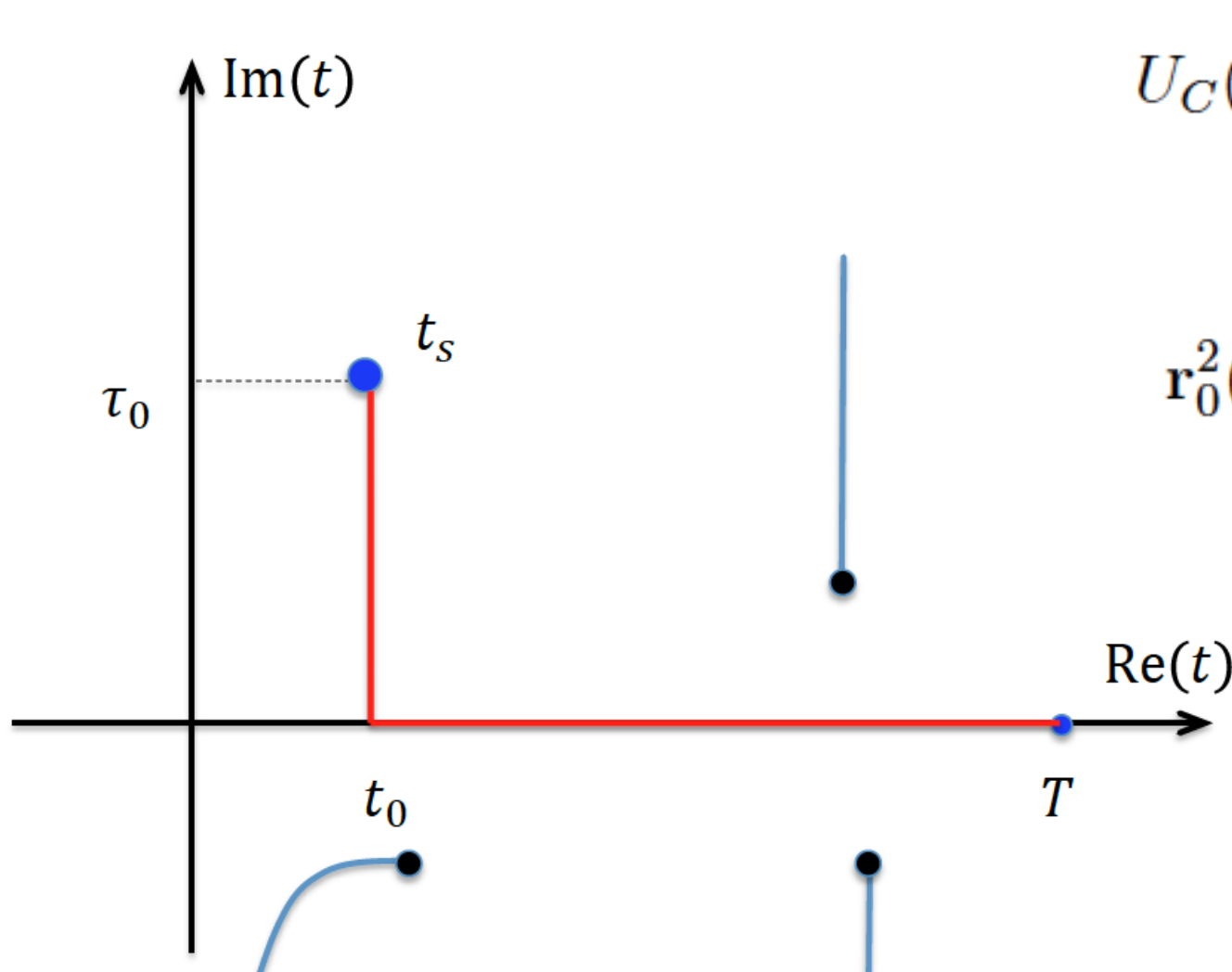
Метод мнимого времени: учет кулоновского взаимодействия

$$\tilde{M}_\alpha(\mathbf{p}) \sim \exp \left\{ i[W_{0\alpha} + W_{C1\alpha} + W_{C2\alpha}] \right\} \equiv Q_{1\alpha} \cdot Q_{2\alpha} \cdot M(\mathbf{p})_\alpha$$

Это сложнее чем кажется:

- решение можно строить только по теории возмущений, но кулоновская сила не везде мала по сравнению с лазерной;
- кулоновские поправки к действию логарифмически расходятся в начале координат;
- кулоновская энергия имеет полюсы и точки ветвления в комплексной плоскости времени

Метод мнимого времени: учет кулоновского взаимодействия



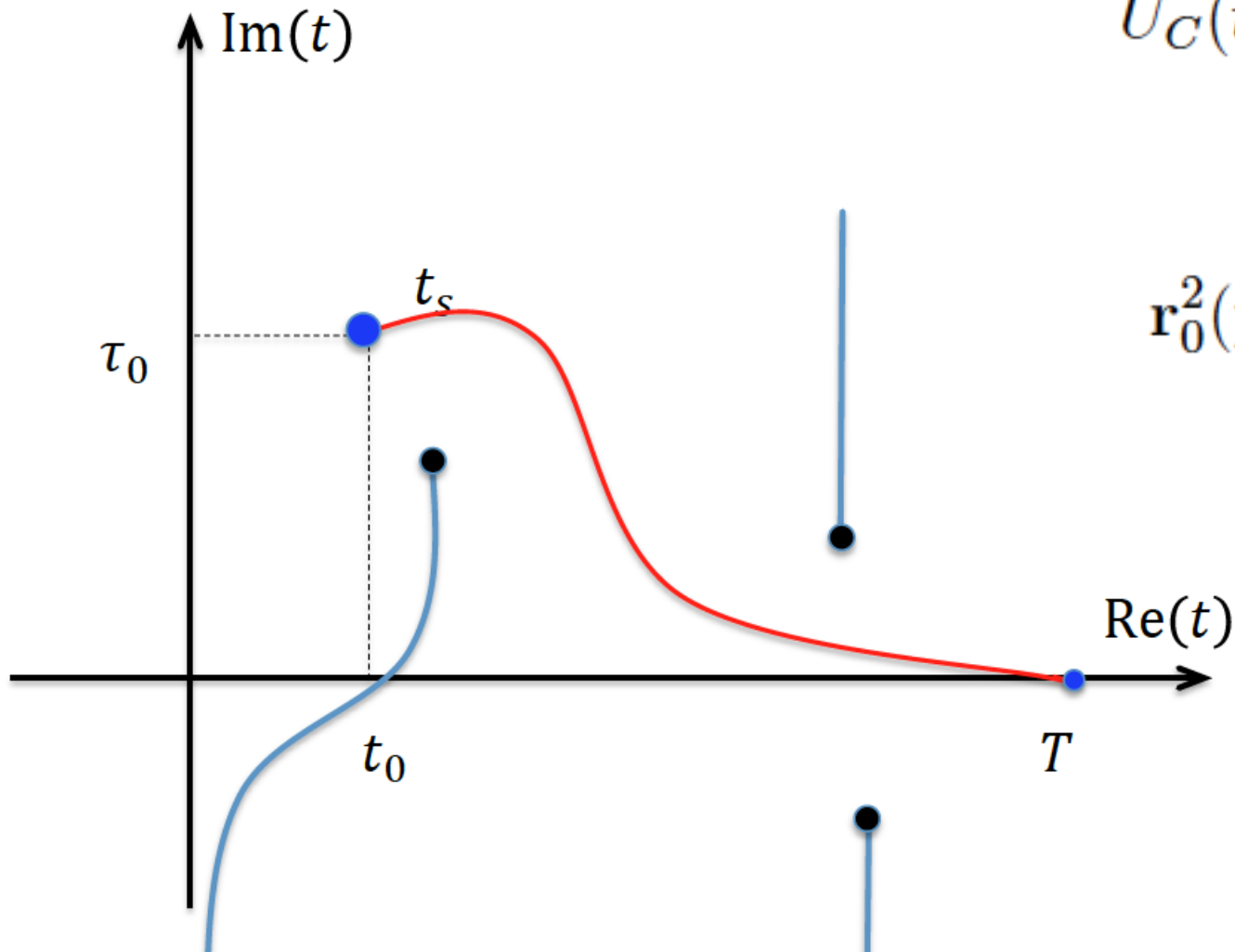
$$U_C(t) = -\frac{Z}{\sqrt{r_0^2(\mathbf{p}, t)}}$$

$$r_0^2(\mathbf{p}, t_n) = 0$$

Метод мнимого времени: учет кулоновского взаимодействия

$$U_C(t) = -\frac{Z}{\sqrt{r_0^2(\mathbf{p}, t)}}$$

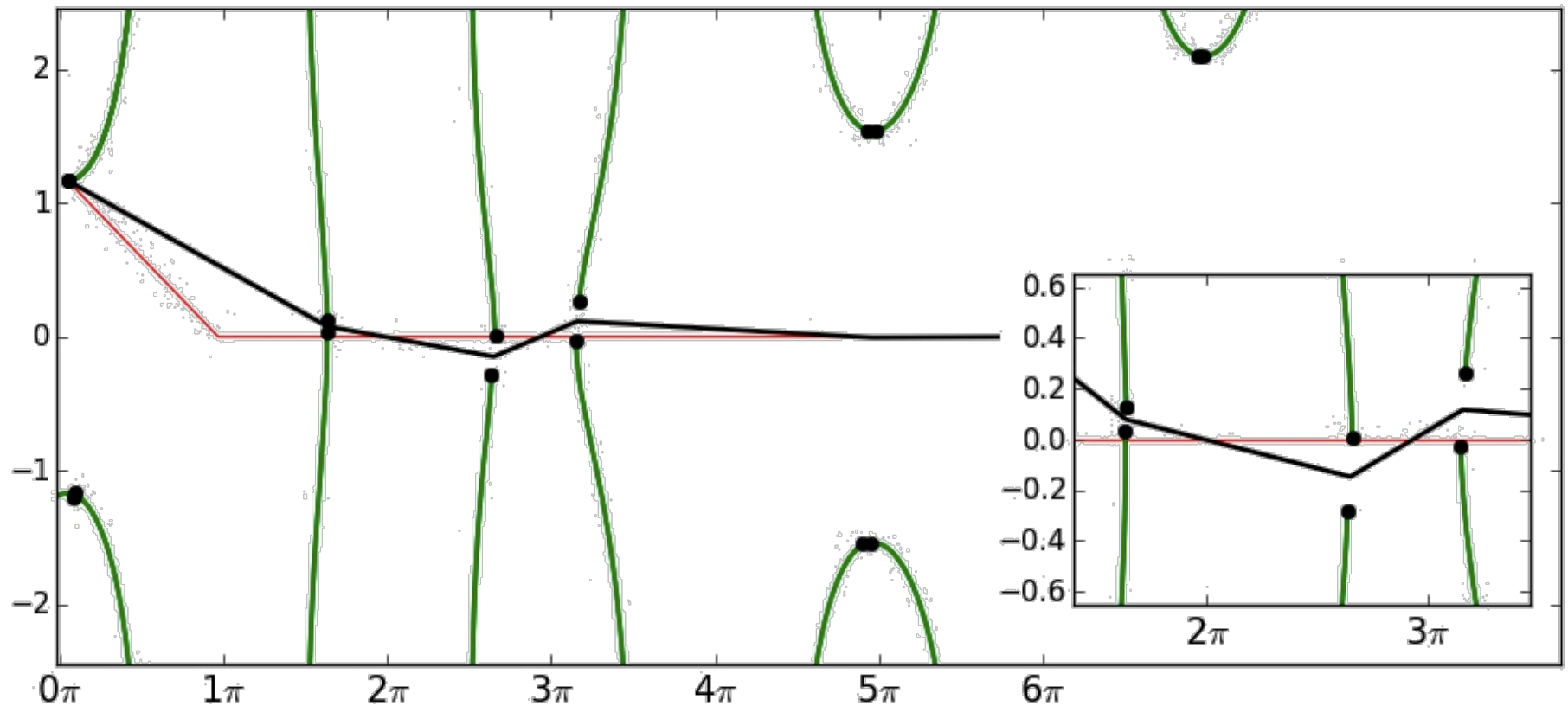
$$r_0^2(\mathbf{p}, t_n) = 0$$



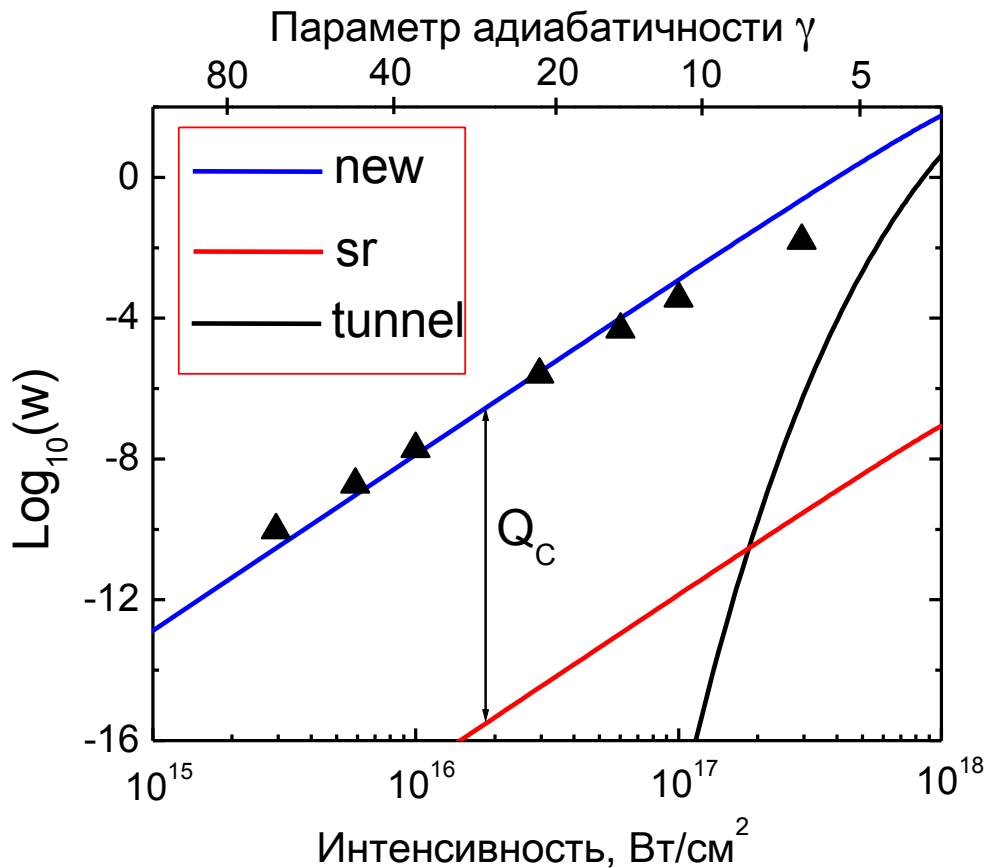
Метод мнимого времени: кулоновское взаимодействие в комплексном пространстве времени

$$U_C(t) = -\frac{Z}{\sqrt{r_0^2(\mathbf{p}, t)}}$$

$$r_0^2(\mathbf{p}, t_n) = 0$$



Множественная ионизация в поле рентгеновских лазеров



$$Q_C \approx 9 \cdot 10^8$$

$$w = \left(\frac{2}{F}\right)^{2n^*} \cdot \left(1 + \frac{2\gamma}{e}\right)^{-2n^*} \cdot w_{sr}$$

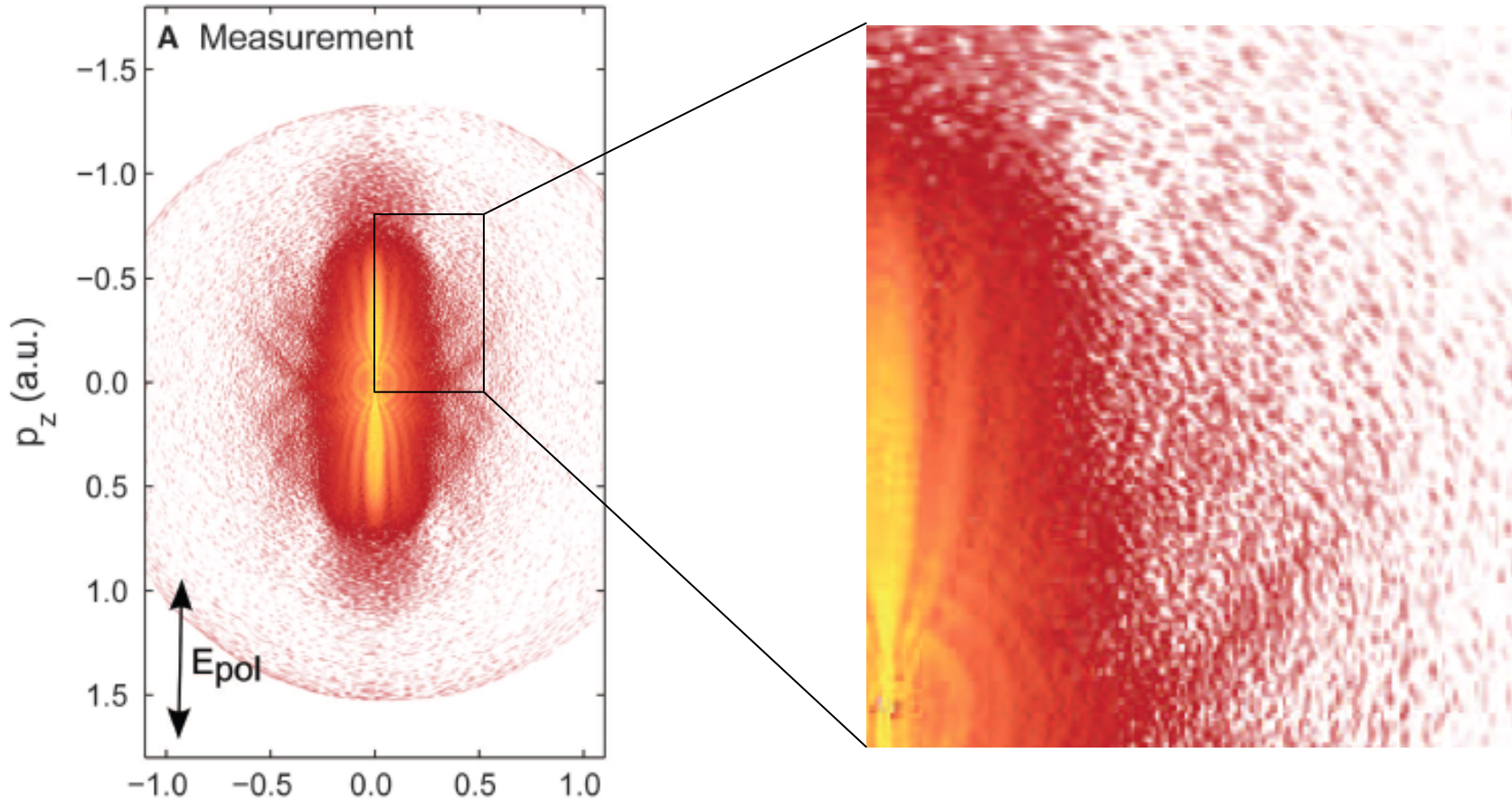
$$\gamma = \frac{\sqrt{2I_p}\omega}{E_0} \quad n^* = \frac{Z}{\sqrt{2I_p}}$$

Скорость ионизации Xe^{17+} полем рентгеновского лазера с энергией фотона 93эВ (13нм).

Состояние $4p^0$ с потенциалом ионизации 434эВ.

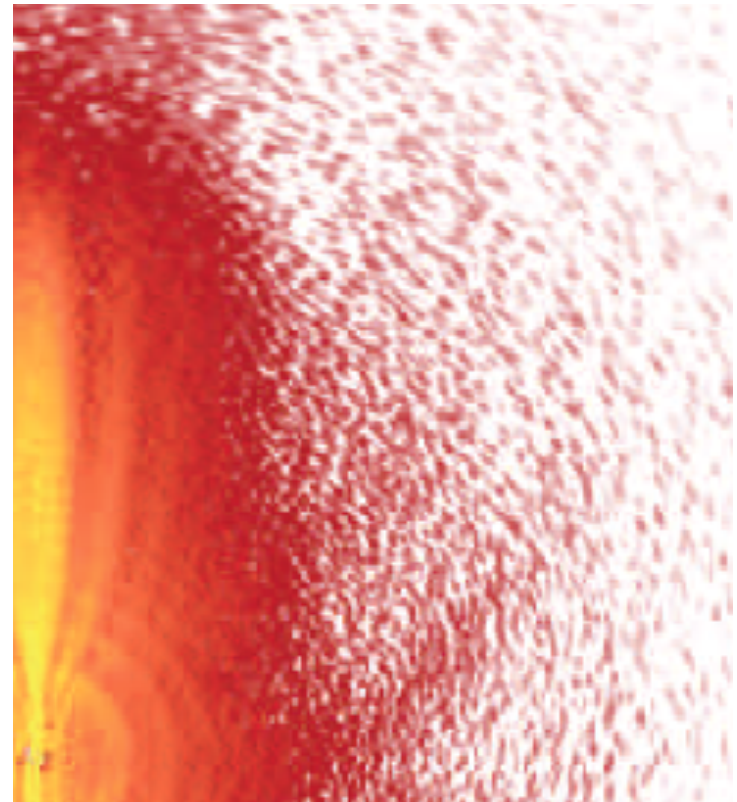
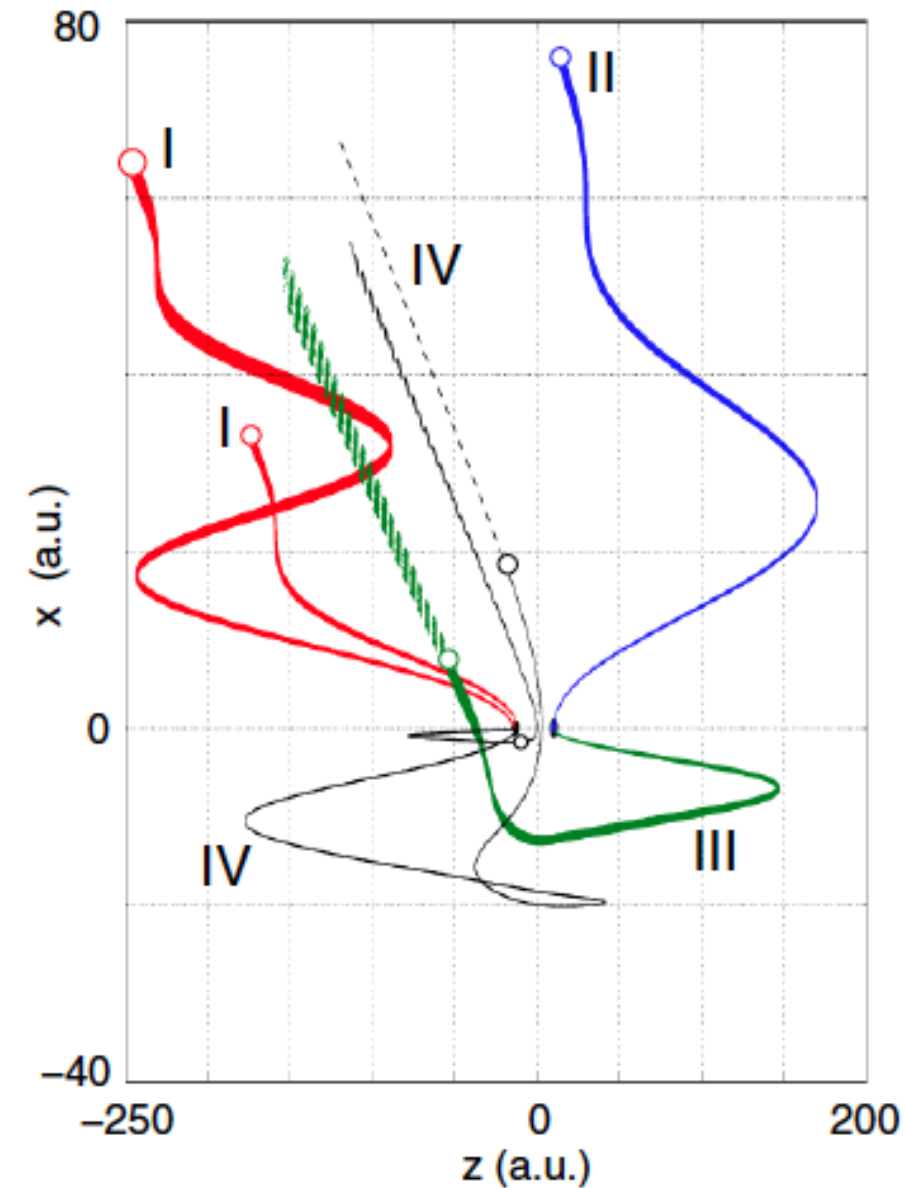
Треугольниками показана скорость, найденная численным интегрированием TDSE.

Новые типы траекторий



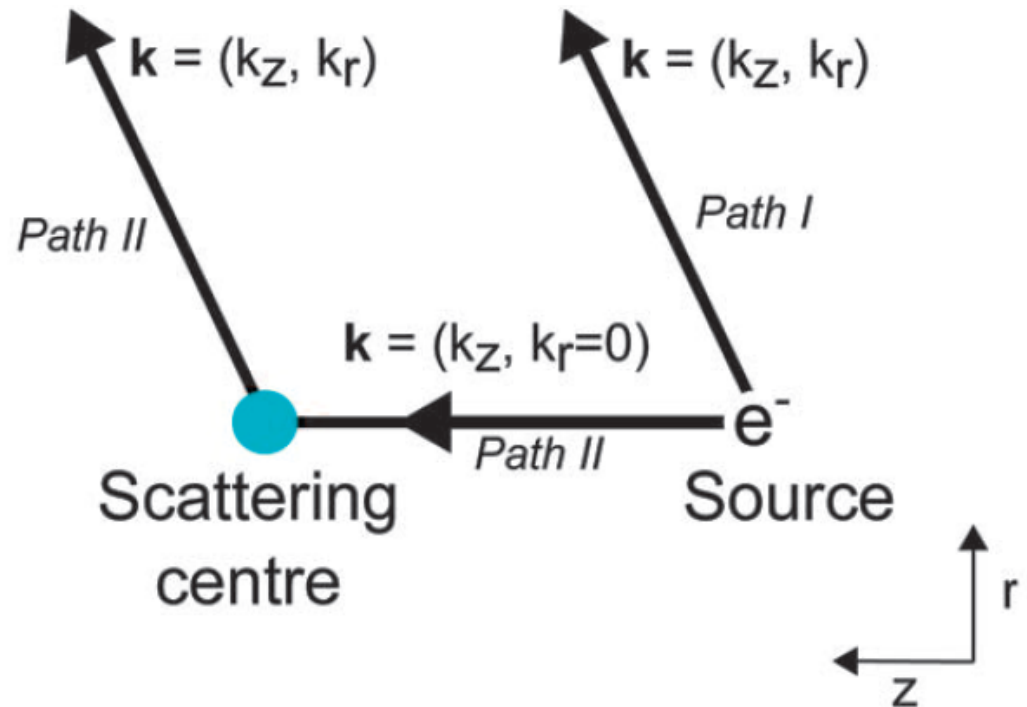
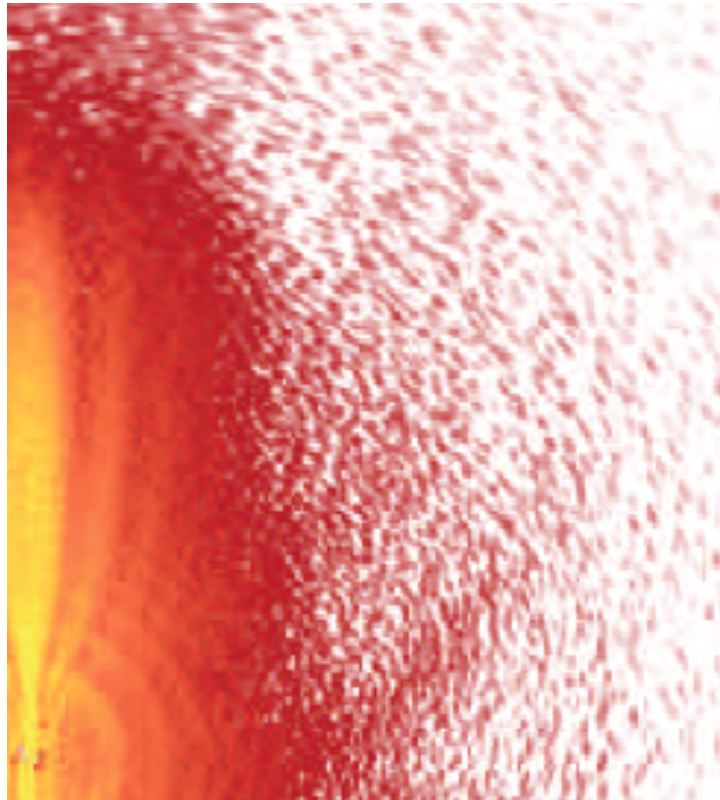
Ionization of metastable Xe 6s by a $7\mu\text{m}$ $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ from the FELICE source

«Кулоновские» траектории



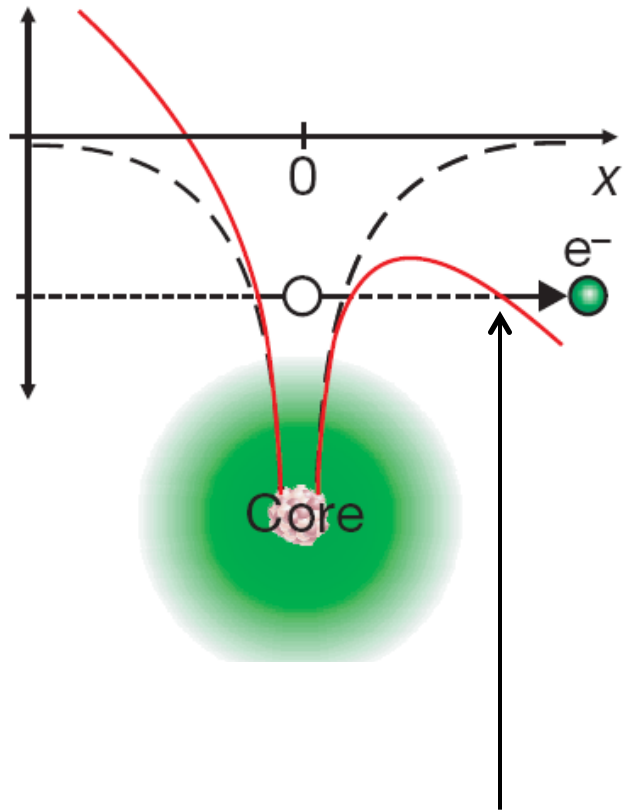
T-M. Yan, SVP, D. Bauer,
M.J.J. Vrakking
PRL, 2010

Фотоэлектронная голография



By measuring the interference structure one can monitor the evolution of a molecule with a femtosecond and angstrom precision – ***photoelectron holography***
Y. Huismans et al., Science 2011

Время туннелирования и туннельный барьер

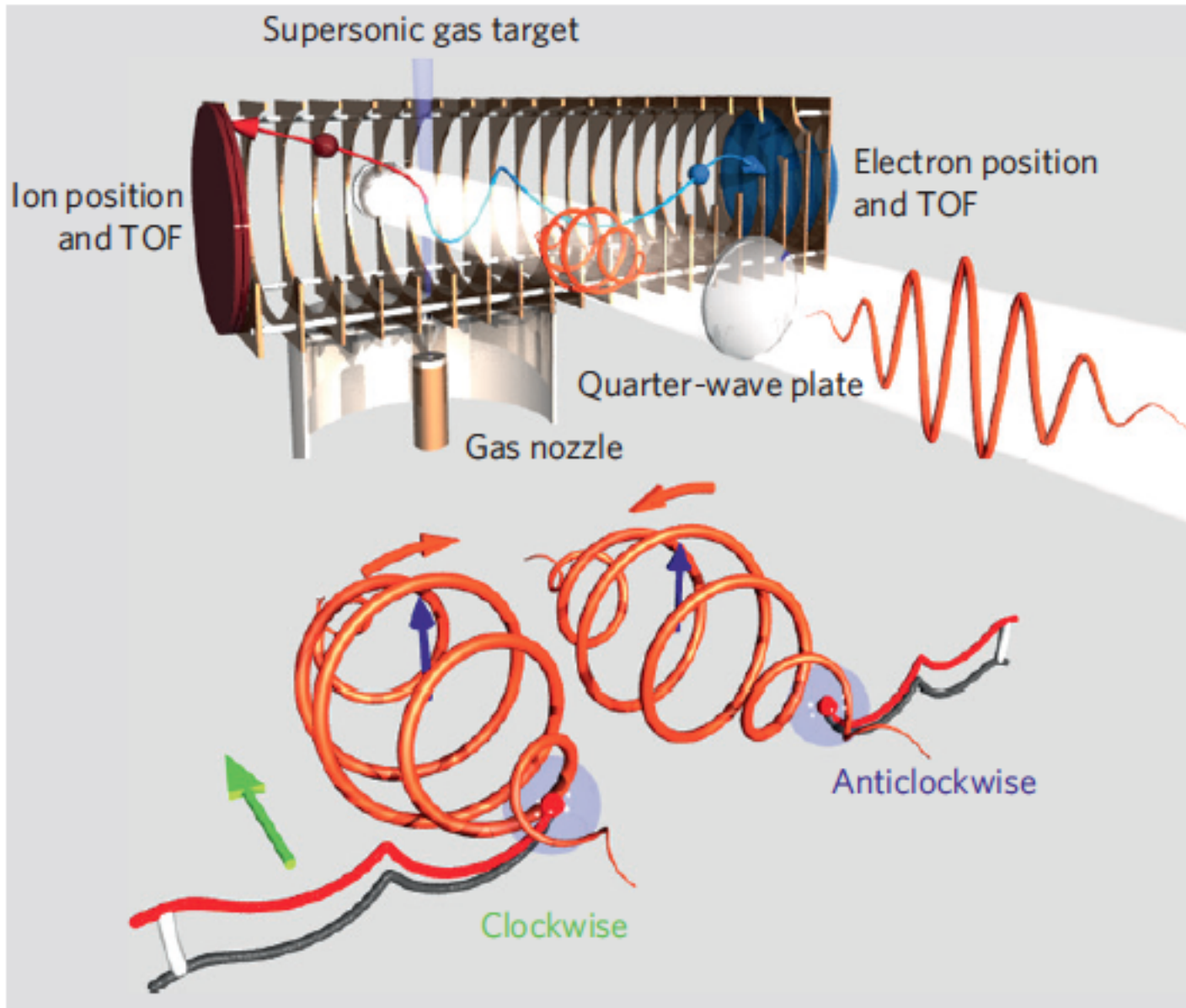


$$V(\mathbf{r}, t) = U_{\text{at}}(r) - \mathbf{F}(t) \cdot \mathbf{r}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2I_p\omega}}{E_0} \ll 1$$

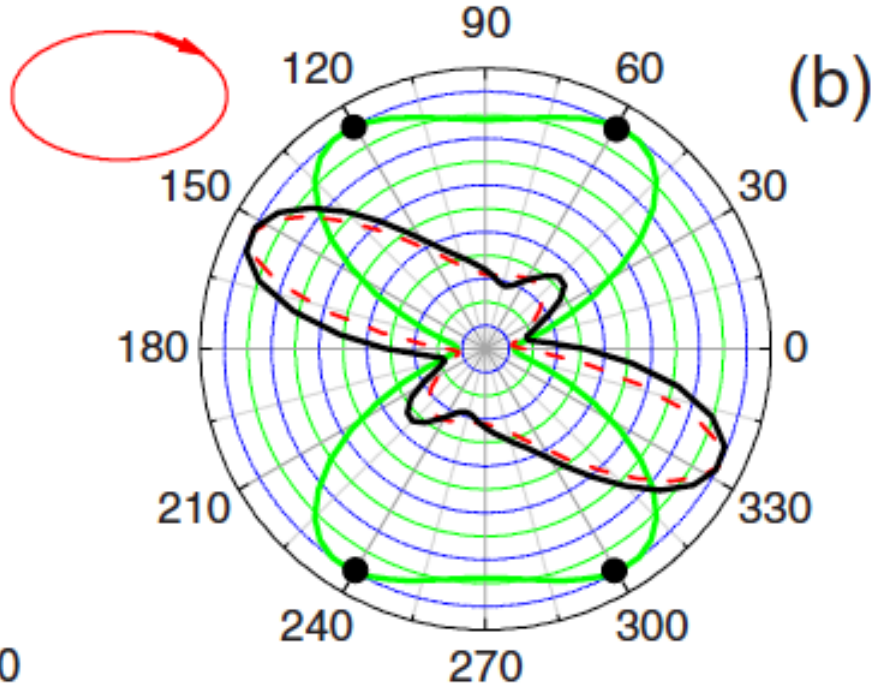
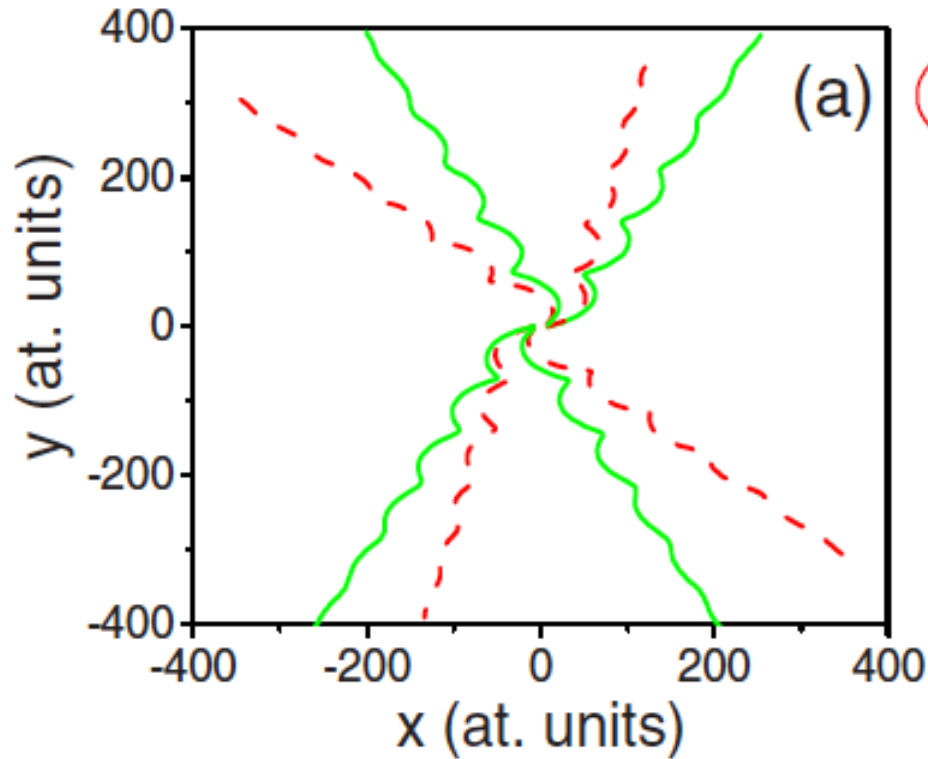
$$b(t) \approx \frac{I_p}{F(t)} \gg a_B$$

Attoclock setup



U. Keller et al., Nature Phys., PRLs

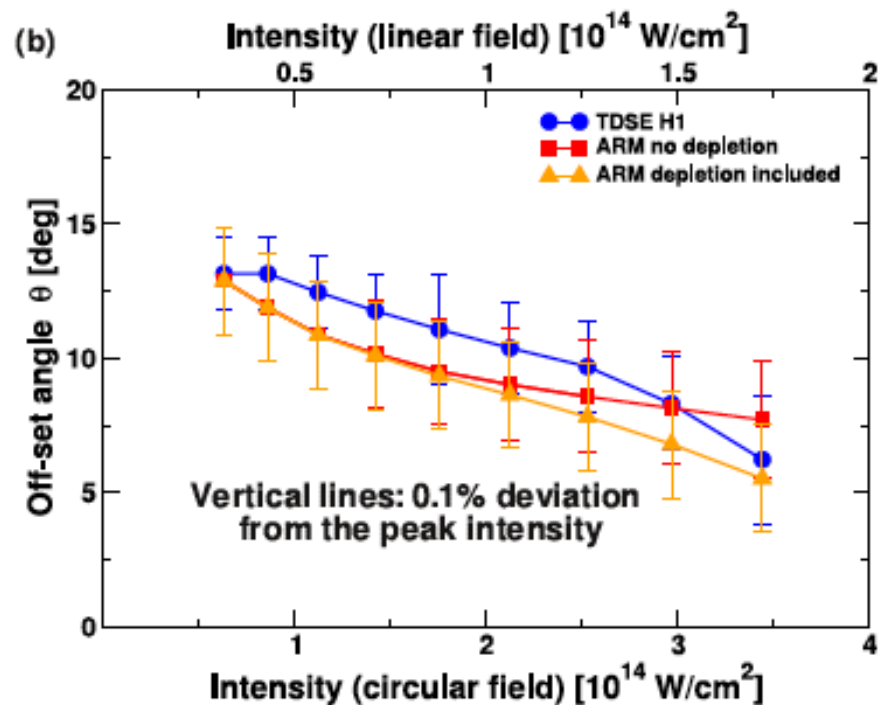
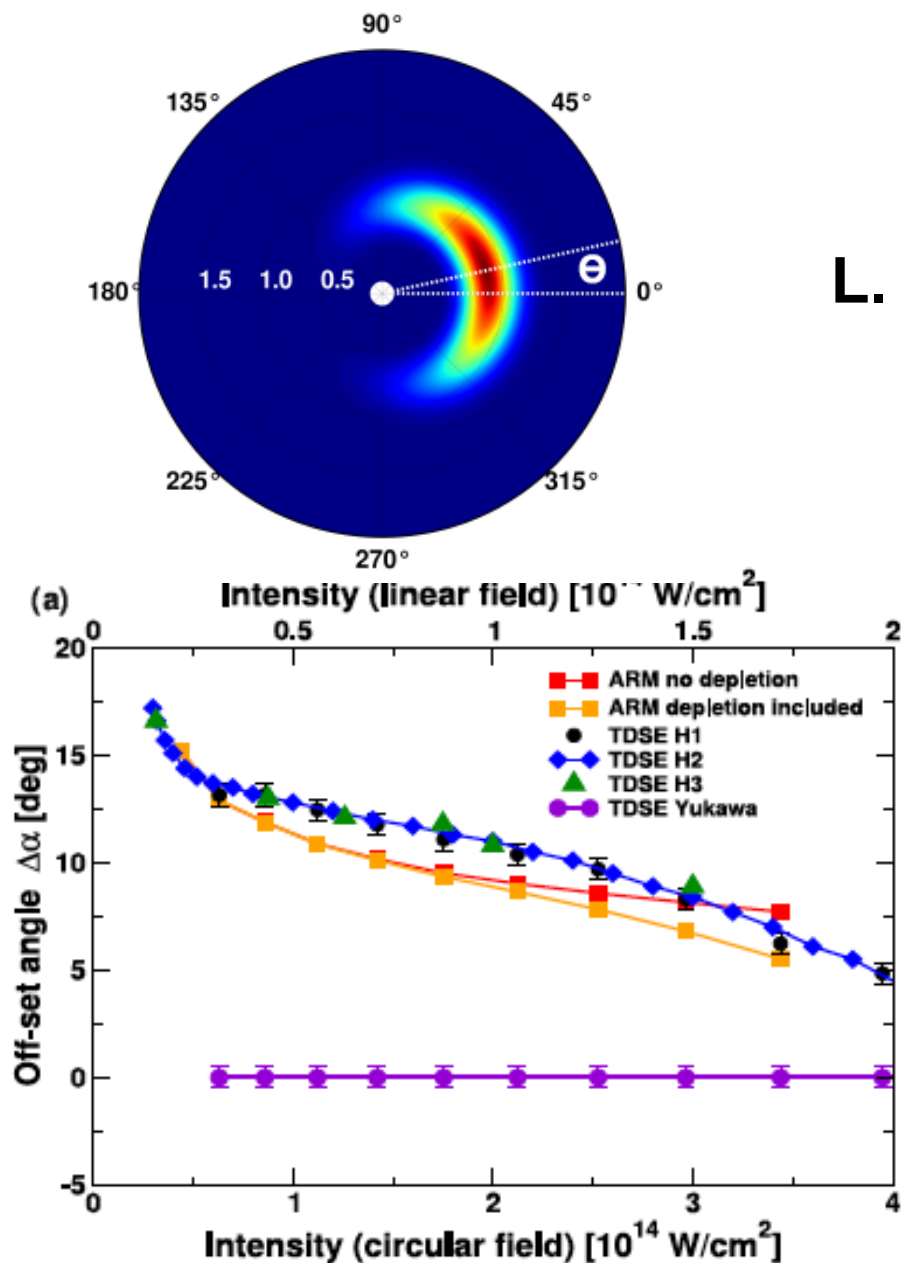
Attoclock setup



Кулоновская асимметрия в угловых распределениях фотоэлектронов в эллиптически поляризованном поле: малая разница между расчетом по методу траекторий (красная линия) и точным результатом (черная) обусловлена ... **задержкой электрона под барьером**

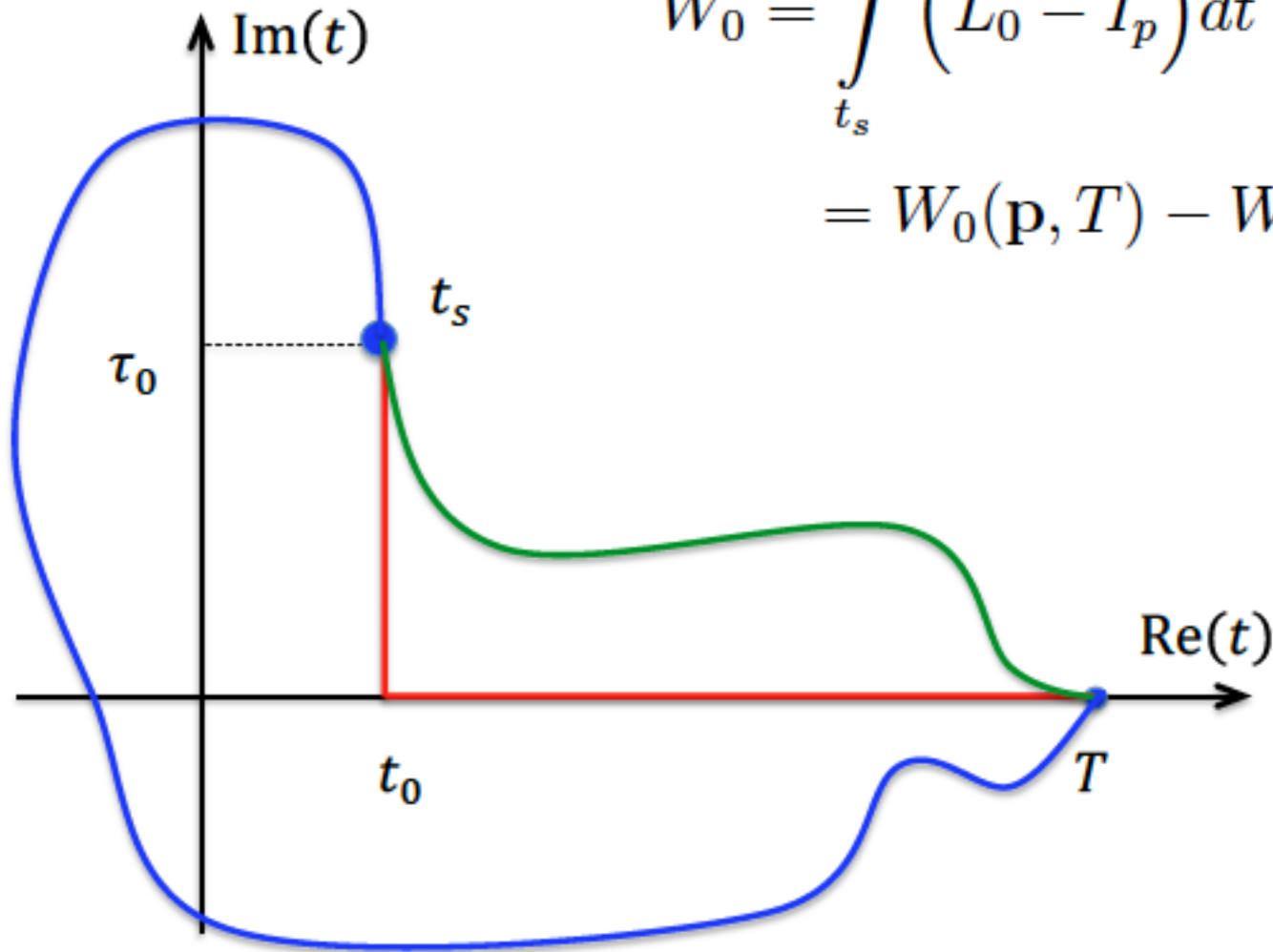
Attoclock setup

L. Torlina et al., Nat. Phys. 2015



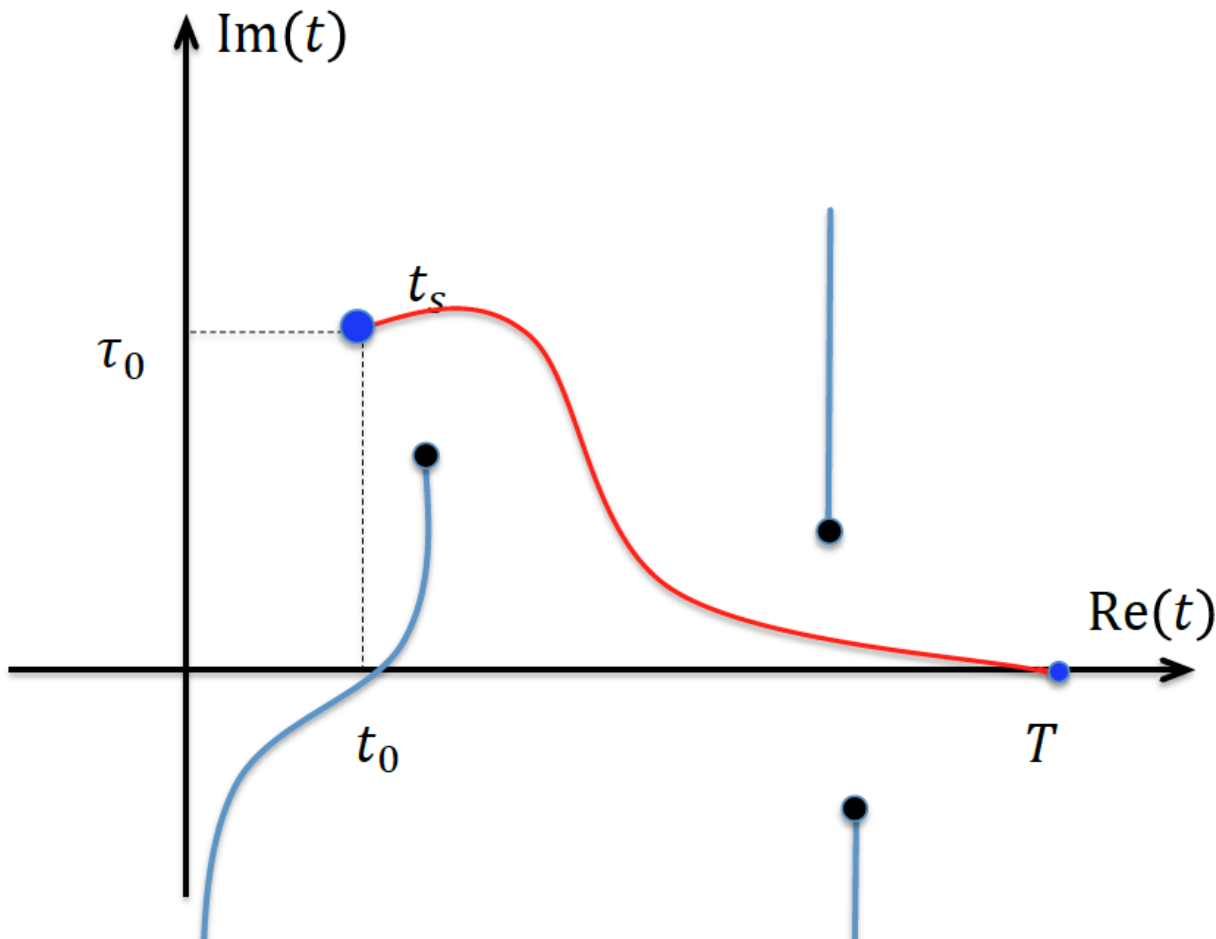
Существует ли точка выхода из-под барьера?

$$W_0 = \int_{t_s}^T (L_0 - I_p) dt - \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{r}_0 \Big|_{t_s}^T = \\ = W_0(\mathbf{p}, T) - W_0(\mathbf{p}, t_s)$$



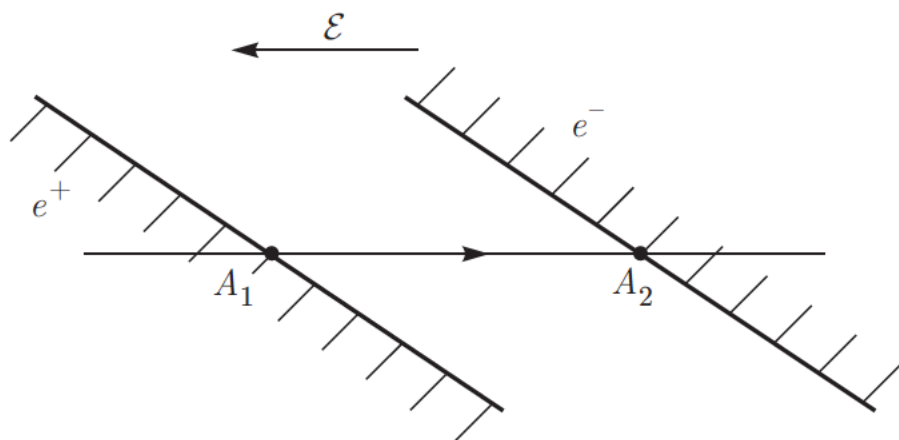
Существует ли точка выхода из-под барьера?

$$W = W_0 + Z \int_{t_s}^T \frac{dt}{\sqrt{r_0^2(t)}} = W(\mathbf{p}, T) - W(\mathbf{p}, t_s)$$



ММВ в задаче о рождении пар

$$p(t) = eE_0 t, \quad x(t) = \frac{c\sqrt{p^2 + m^2 c^2}}{eE_0} - \frac{mc^2}{eE_0}$$

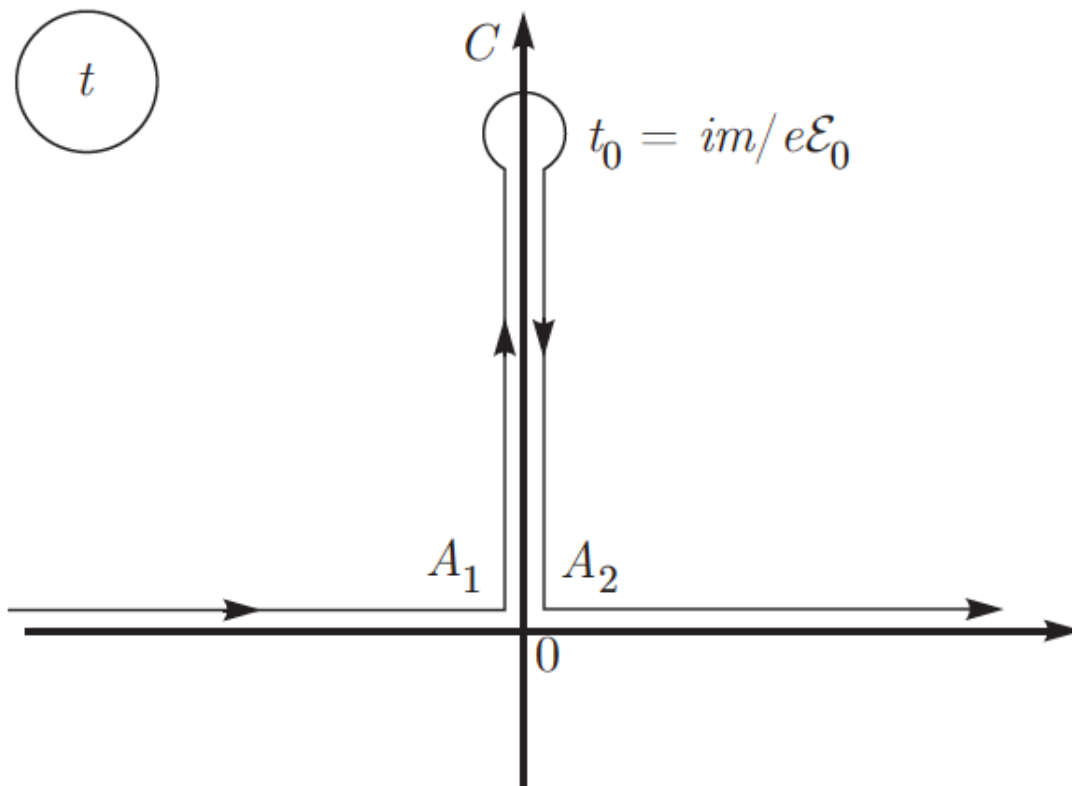


$$p(t_0) = imc$$

$$S = \int_0^t \left\{ -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2} + eE_0 x \right\} dt =$$

$$= \frac{c}{2eE_0} \left\{ p\sqrt{p^2 + m^2 c^2} - m^2 c^2 \ln[p + \sqrt{p^2 + m^2 c^2}] \right\}$$

ММВ в задаче о рождении пар



$$p(t_0) = imc$$

$$w \sim \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \text{Im} S \right\} = \exp \left\{ -\frac{\pi E_{\text{cr}}}{E_0} \right\}$$

$$E_{\text{cr}} = \frac{m^2 c^3}{e \hbar} \simeq 1.32 \cdot 10^{16} \text{ V/cm}$$

Итоговые замечания

Представление амплитуд нелинейных квантовых процессов в интенсивном лазерном поле в комплексных классических траекторий:

- позволяет дать наглядную физическую интерпретацию, что позволяет, в частности, предсказывать новые эффекты;
- дает мощный вычислительный инструмент для решения новых задач;

Итоговые замечания

Представление амплитуд нелинейных квантовых процессов в интенсивном лазерном поле в комплексных классических траекторий:

- позволяет дать наглядную физическую интерпретацию, что позволяет, в частности, предсказывать новые эффекты;
- дает мощный вычислительный инструмент для решения новых задач;
- **удобно для параллельных расчетов**

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta - \frac{Ze^2}{r} - e\mathbf{E}_L(t) \cdot \mathbf{r} \right\} \Psi \quad \Leftrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\mathbf{r}} = eE_L(t) - \frac{Ze^2 \mathbf{r}}{r^3} \\ \mathbf{r}(t_s) = 0, \quad \dot{\mathbf{r}}(t \rightarrow \infty) = \mathbf{p}, \\ t_s = t_s(\mathbf{p}) \end{array} \right.$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!