

Исследование недипольных эффектов (НДЭ) во взаимодействии атомов с монохроматическим излучением ИКИ: ускорение атомов, влияние НДЭ на ионизацию атомов и генерацию высших гармоник

В.С. Мележик

БЛТФ ОИЯИ, г. Дубна



Совещание совета РАН по фундаментальной ядерной физике

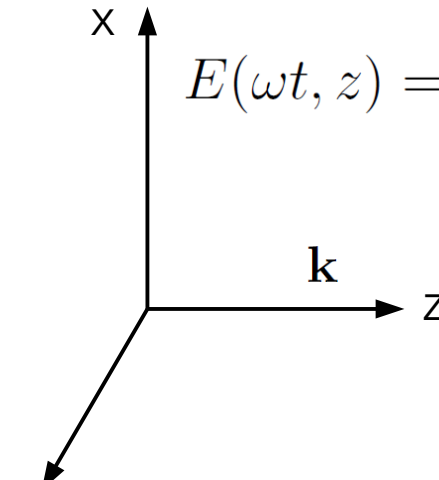
ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, 20-21 марта 2023 г.

Содержание

- Недипольные эффекты (НДЭ) при взаимодействии атомов с ЭМ излучением в рентгеновском диапазоне
- Неразделение переменных в атоме водорода, стимулируемое НДЭ при взаимодействии с сильным лазерным излучением
- Квантово-квазиклассический подход для анализа НДЭ при взаимодействии атомов с сильным ЭМ излучением
- Перспективные задачи: ускорение атомов ИКИ, влияние НДЭ на «стабилизацию» атомов и на генерацию высших гармоник в ИКИ ...

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом

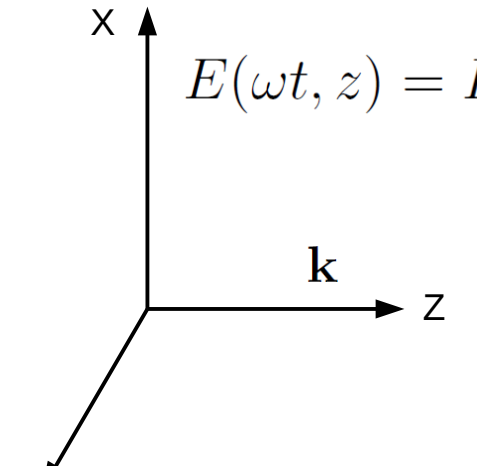

$$E(\omega t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \frac{\omega}{c}z)$$
$$B(\omega t, z) = \frac{1}{c}E(\omega t, z)$$
$$\frac{1}{c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

оптический диапазон $\lambda \sim 500\text{nm}$ $\omega \sim 10^{-1} a.u.$

$$\frac{\omega}{c} \simeq \frac{10^{-1}}{137} \rightarrow 0 \quad \text{дипольное приближение}$$

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом

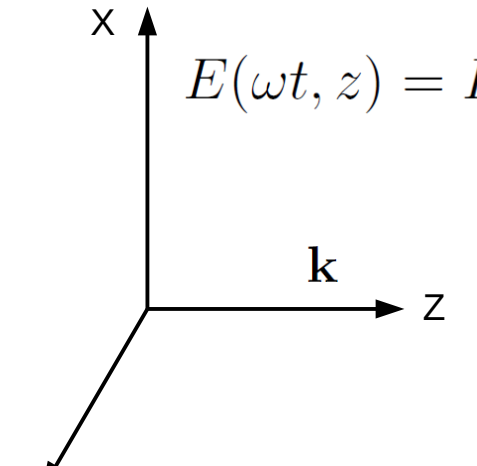

$$E(\omega t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \cancel{\frac{\omega}{c}z})$$
$$B(\omega t, z) = \cancel{\frac{1}{c}E(\omega t, z)}$$
$$\frac{1}{c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

оптический диапазон $\lambda \sim 500\text{nm}$ $\omega \sim 10^{-1} a.u.$

$$\frac{\omega}{c} \simeq \frac{10^{-1}}{137} \rightarrow 0 \quad \text{дипольное приближение}$$

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом


$$E(\omega t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \cancel{\frac{\omega}{c}z})$$
$$B(\omega t, z) = \cancel{\frac{1}{c}E(\omega t, z)}$$
$$\frac{1}{c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

оптический диапазон $\lambda \sim 500\text{nm}$ $\omega \sim 10^{-1}a.u.$

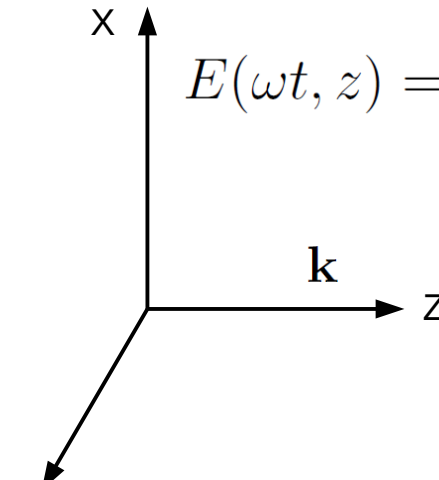
$$\frac{\omega}{c} \simeq \frac{10^{-1}}{137} \rightarrow 0 \quad \text{дипольное приближение}$$

рентген $\lambda \sim (10^2 - 10^{-3})\text{nm}$ $\omega \sim (1 - 10^4)a.u.$

$$\frac{\omega}{c} \sim \frac{1}{137} - 10^2$$

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом


$$E(\omega t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \frac{\omega}{c}z)$$
$$B(\omega t, z) = \frac{1}{c}E(\omega t, z)$$
$$\frac{1}{c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

оптический диапазон $\lambda \sim 500\text{nm}$ $\omega \sim 10^{-1}a.u.$

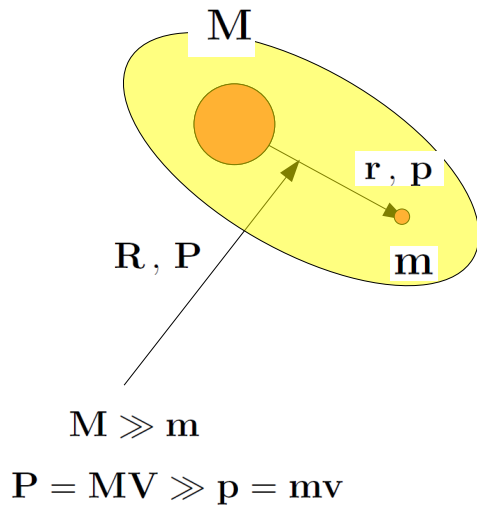
$$\frac{\omega}{c} \simeq \frac{10^{-1}}{137} \rightarrow 0$$

~~дипольное приближение~~

рентген $\lambda \sim (10^2 - 10^{-3})\text{nm}$ $\omega \sim (1 - 10^4)a.u.$

$$\frac{\omega}{c} \sim \frac{1}{137} - 10^2$$

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



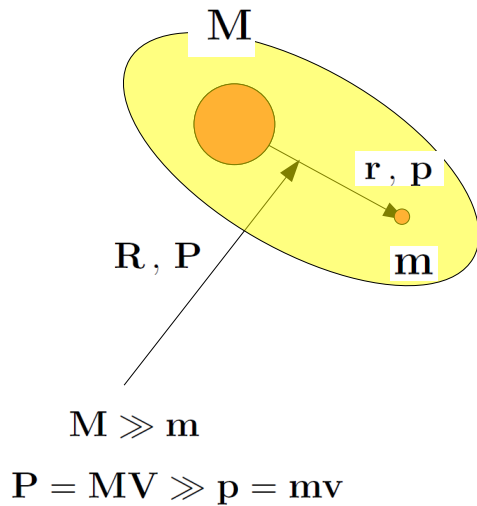
$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)$$

$$h_0(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2\mu} - \frac{1}{r}$$

$$V_1(\mathbf{r}) = E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) x + \frac{1}{c} [\cos(\omega t) \hat{l}_y + \omega \sin(\omega t) x z] \right\},$$

$$V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \frac{1}{c} E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) [Z \hat{p}_x - X \hat{p}_z] + \omega \sin(\omega t) [xZ + zX] \right\}$$

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



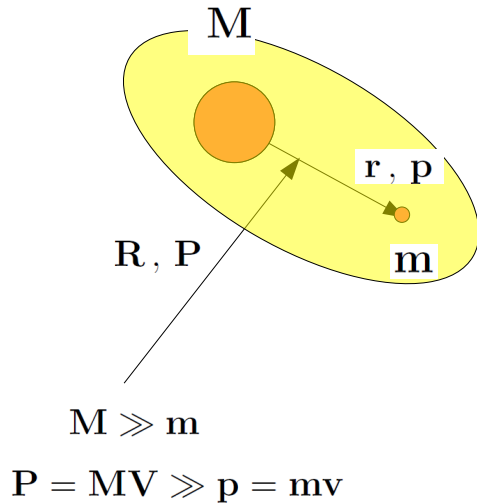
$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + \boxed{h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)}$$

$$h_0(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2\mu} - \frac{1}{r}$$

$$\boxed{V_1(\mathbf{r}) = E_0 f(t) \{ \cos(\omega t) x + \frac{1}{c} [\cos(\omega t) \hat{l}_y + \omega \sin(\omega t) x z] \}},$$

$$V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \frac{1}{c} E_0 f(t) \{ \cos(\omega t) [Z \hat{p}_x - X \hat{p}_z] + \omega \sin(\omega t) [xZ + zX] \}$$

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



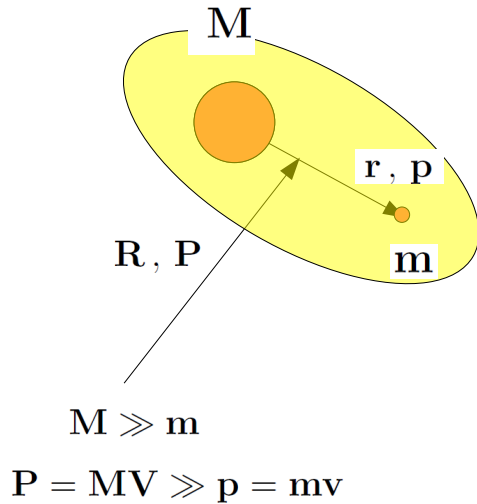
$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + \boxed{h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)}$$

$$h_0(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2\mu} - \frac{1}{r}$$

$$\boxed{V_1(\mathbf{r}) = E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) x + \frac{1}{c} [\cos(\omega t) \hat{l}_y + \omega \sin(\omega t) x z] \right\}},$$

$$V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \frac{1}{c} E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) [Z \hat{p}_x - X \hat{p}_z] + \omega \sin(\omega t) [xZ + zX] \right\}$$

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + \underline{V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)}$$

$$h_0(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2\mu} - \frac{1}{r}$$

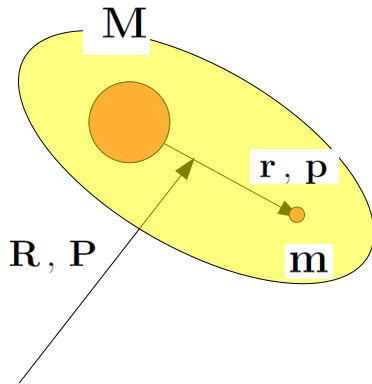
$$V_1(\mathbf{r}) = E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) x + \frac{1}{c} [\cos(\omega t) \hat{l}_y + \omega \sin(\omega t) x z] \right\},$$

$$V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \frac{1}{c} E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) [Z \hat{p}_x - X \hat{p}_z] + \omega \sin(\omega t) [x Z + z X] \right\}$$



неразделение переменных ЦМ и электрона $\sim \frac{1}{c}, \frac{\omega}{c}$

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + \underline{V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)}$$

$$h_0(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2\mu} - \frac{1}{r}$$

PHYSICAL REVIEW LETTERS **124**, 233202 (2020)

Dissecting Strong-Field Excitation Dynamics with Atomic-Momentum Spectroscopy

A. W. Bray,^{1,2,*} U. Eichmann,^{2,†} and S. Patchkovskii^{2,‡}

¹Australian National University, Canberra ACT 2601, Australia

²Max-Born-Institute, 12489 Berlin, Germany

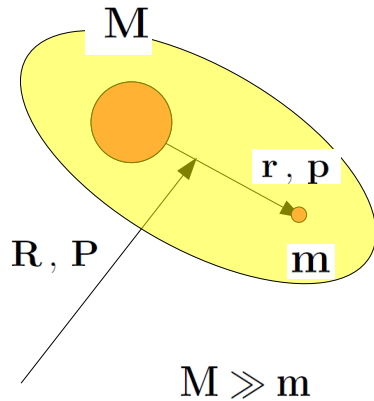
$$\mathbf{P} = M\mathbf{V} \gg \mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) \rightarrow H_{eff}(\mathbf{r}, t) = h_0(\mathbf{r}) + V_{eff}(\mathbf{r}, t) \quad \mathbf{3D} \quad !!$$

We propose using the c.m. degrees of freedom of atoms and molecules as a “built-in” monitoring device for observing their internal dynamics in nonperturbative laser fields.

detection of the internal electron quantum dynamics with CM-velocity spectroscopy.

Атом водорода в сильном лазерном поле (квантово-квазиклассический метод)



$$\mathbf{P} = M\mathbf{V} \gg \mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

classical ideal gas perfectly describes gas laws

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(\mathbf{r}, t)\rangle = [H_0(\mathbf{r}) + V(\mathbf{r}, \mathbf{R}(t))] |\psi(\mathbf{r}, t)\rangle$$

$$H_{cl}(\mathbf{P}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + \langle \psi(\mathbf{r}, t) | V(\mathbf{r}, \mathbf{R}(t)) | \psi(\mathbf{r}, t) \rangle$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{R}} H_{cl}(\mathbf{P}, \mathbf{R}, t)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{R} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{P}} H_{cl}(\mathbf{P}, \mathbf{R}, t)$$

$$\psi(\mathbf{r}, t = -n_T T/2) = \phi_{nlm}(\mathbf{r}),$$

$$\mathbf{R}(t = -n_T T/2) = \mathbf{R}_0, \mathbf{P}(t = -n_T T/2) = \mathbf{P}_0,$$

$$10^{14} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Quantum-quasiclassical analysis of center-of-mass nonseparability in hydrogen atom stimulated by strong laser fields*

Vladimir S Melezhik 

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Moscow Region 141980, Russia

Dubna State University, 19 Universitetskaya St., Moscow Region 141982, Russia

E-mail: melezhik@theor.jinr.ru

Received 23 November 2022; revised 5 February 2023

Accepted for publication 1 March 2023

Published 22 March 2023



CrossMark

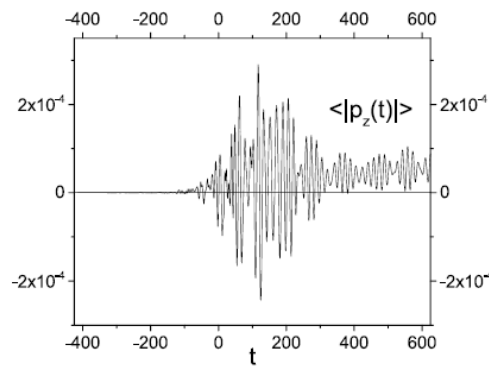
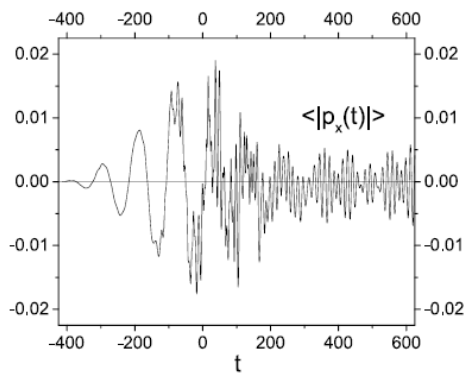
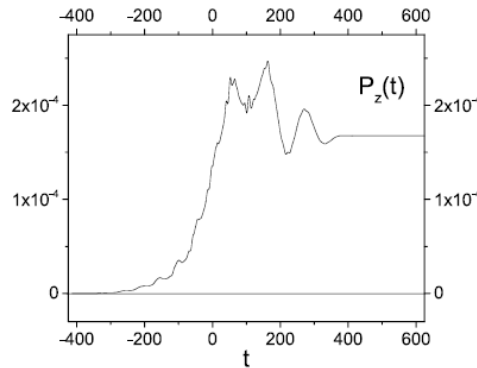
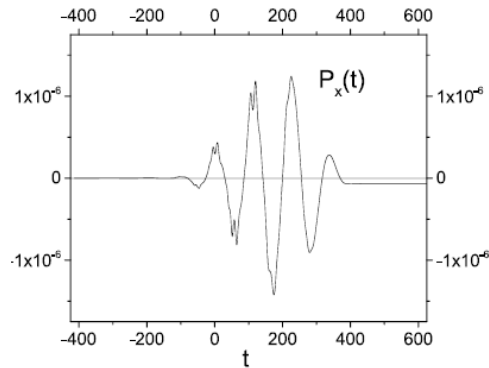
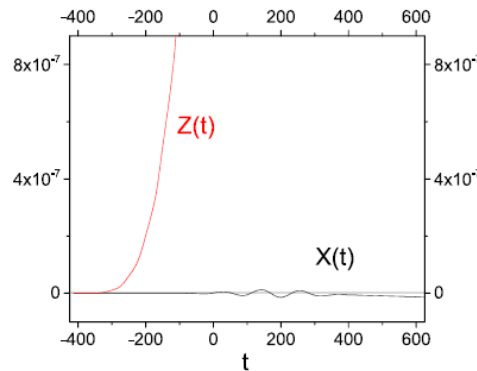
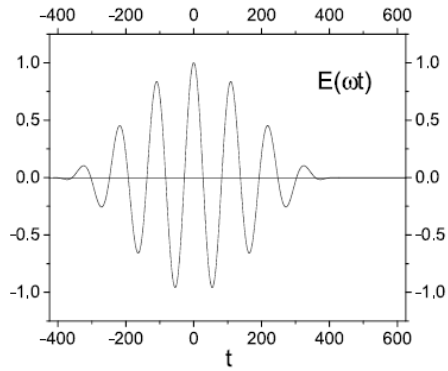
Abstract

We have developed a quantum-quasiclassical computational scheme for quantitative treating of the nonseparable quantum–classical dynamics of the 6D hydrogen atom in a strong laser pulse. In this approach, the electron is treated

Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

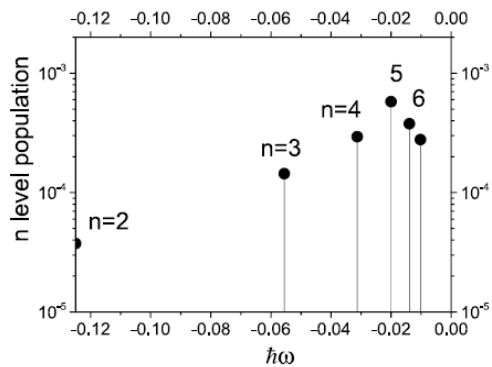
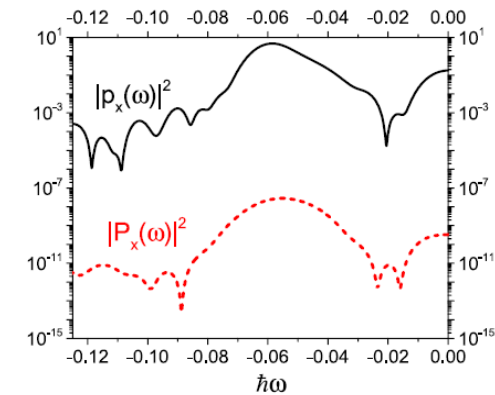
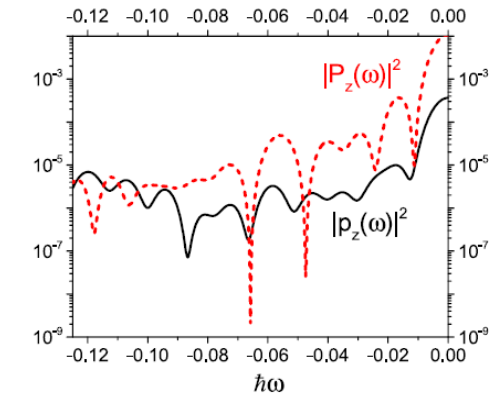
$$\lambda = 800 \text{ nm } (\omega = 0.057 \text{ a.u.})$$

$$10^{14} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$



Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

$$\lambda = 800 \text{ nm } (\omega = 0.057 \text{ a.u.})$$



$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{1}{T_{out} - T_{in}} \int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{\mathbf{P}^2(t)}{2M} dt \sim \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{s=x,y,z} |P_s(\omega)|^2 \right] d\omega,$$

$$\langle E_{kin}^{(el)} \rangle = \frac{1}{T_{out} - T_{in}} \int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{\mathbf{p}^2(t)}{2\mu} dt \sim \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{s=x,y,z} |p_s(\omega)|^2 \right] d\omega,$$

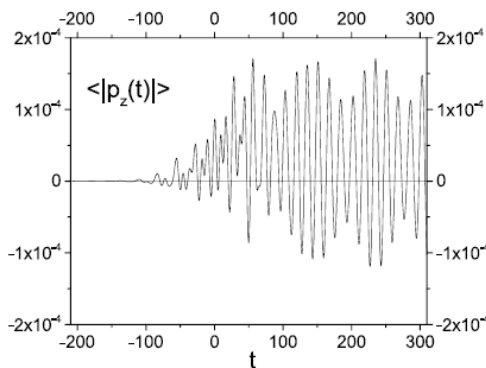
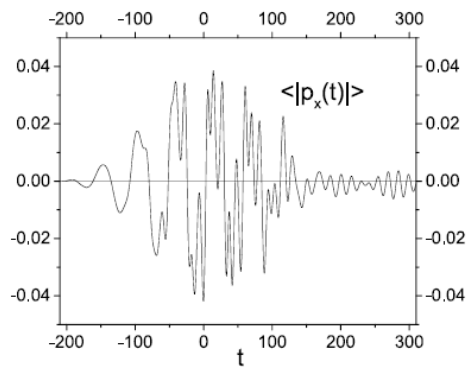
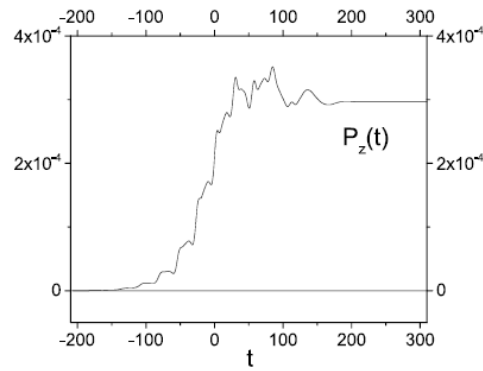
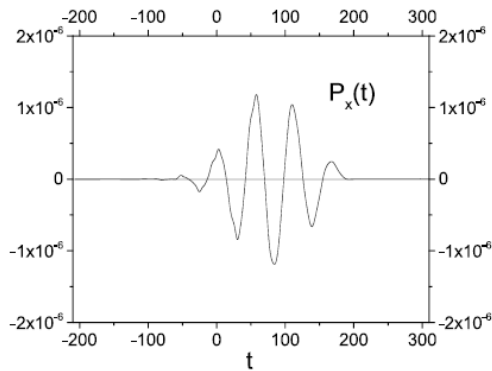
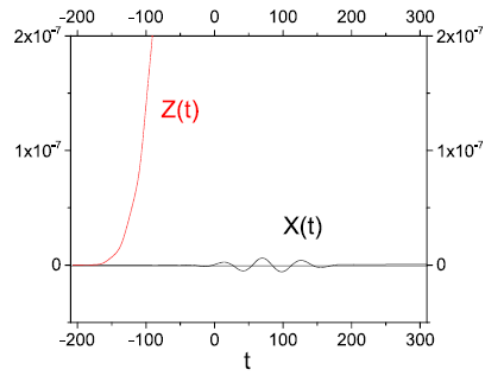
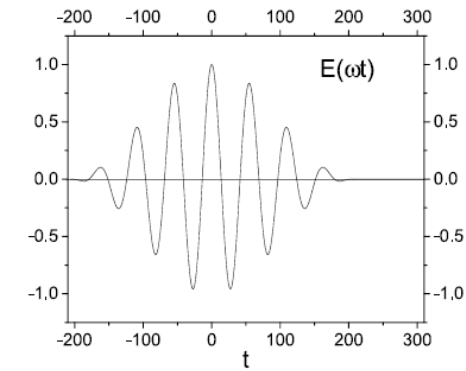
$$P_s(\omega) = \int_{T_{in}}^{T_{out}} P_s(t) e^{i\omega t} dt,$$

$$p_s(\omega) = \int_{T_{in}}^{T_{out}} \langle |p_s(t)| \rangle e^{i\omega t} dt$$

$$\langle |p_s(t)| \rangle = \int \psi^*(\mathbf{r}, t) \hat{p}_s \psi(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}.$$

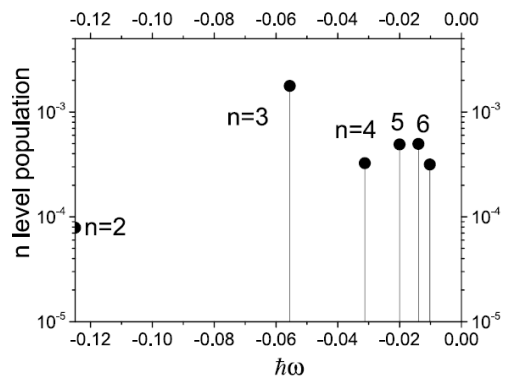
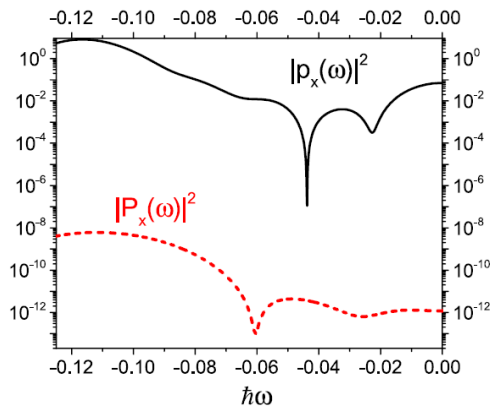
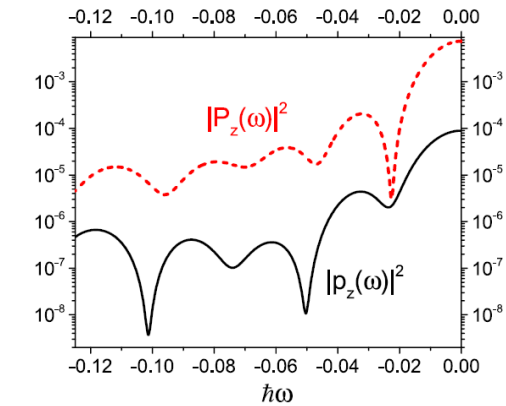
Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

$$\lambda = 400 \text{ nm } (\omega = 0.114 \text{ a.u.})$$



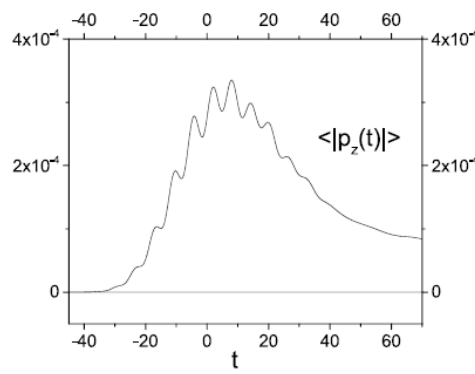
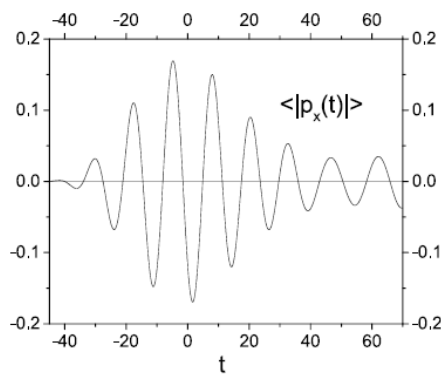
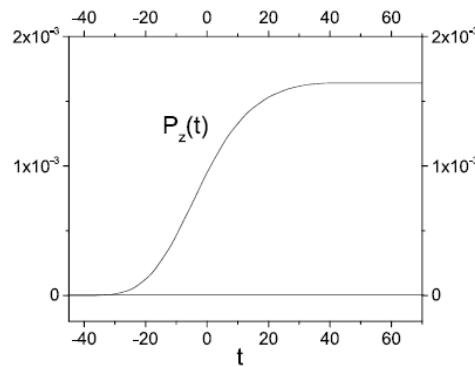
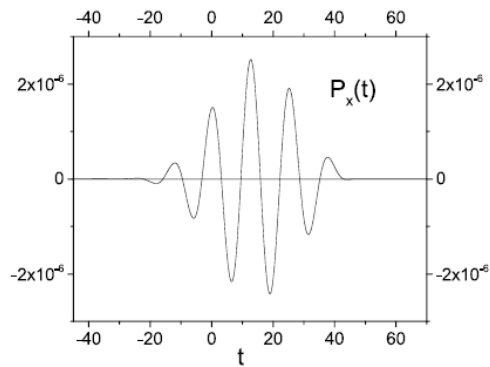
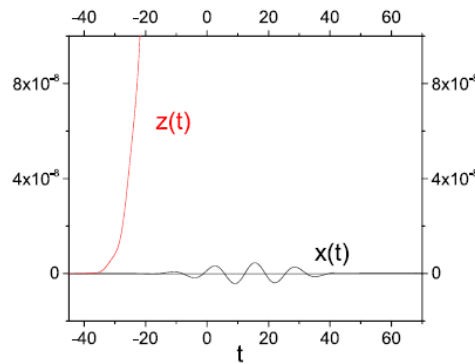
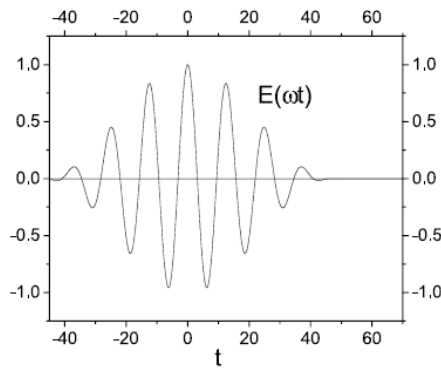
Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

$\lambda = 400 \text{ nm}$ ($\omega = 0.114 \text{ a.u.}$)



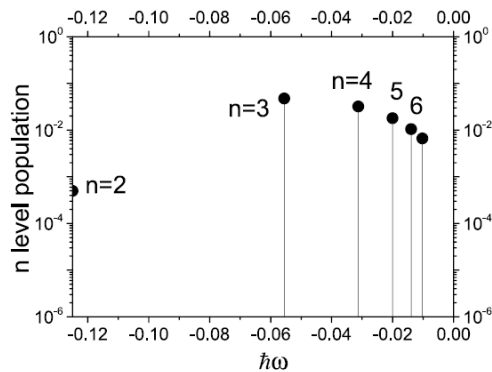
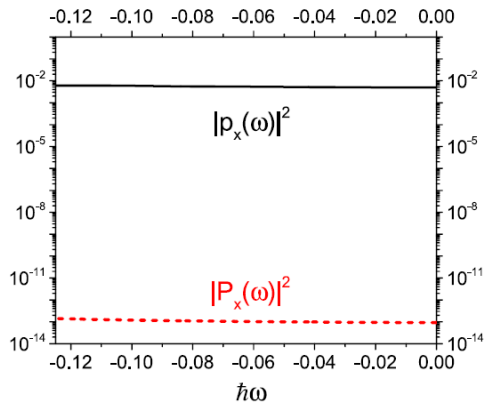
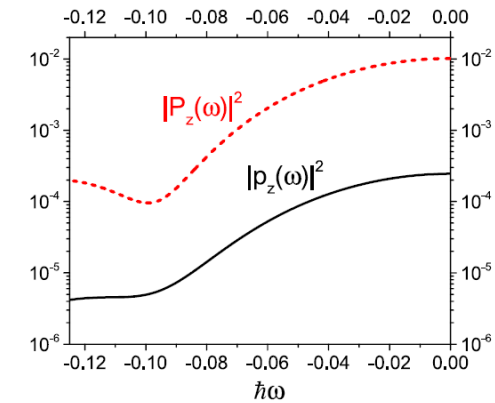
Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

$$\lambda = 90 \text{ nm } (\omega = 0.5 \text{ a.u.})$$



Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

$\lambda = 90 \text{ nm}$ ($\omega = 0.5 \text{ a.u.}$).

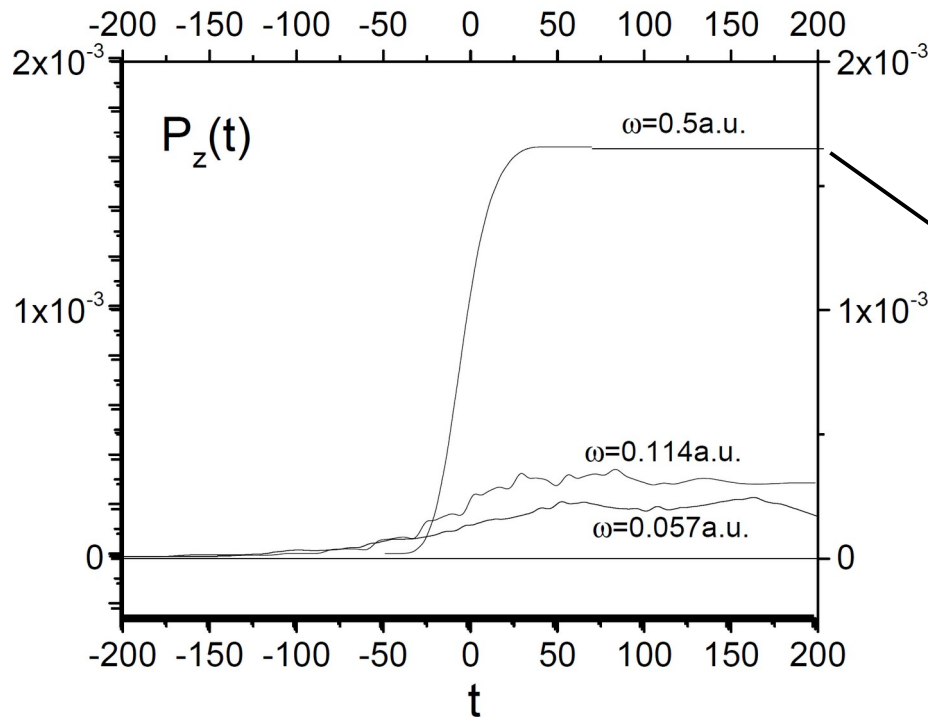


Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

Показано: импульсное распределение атомов воспроизводит форму импульсного распределения электрона внутри атома

Это поддерживает идею использовать *CM-velocity spectroscopy* (классический «детектор») для детектирования внутренней квантовой динамики электрона

Перспективные задачи: ускорение атомов ИКИ



$$10^{14} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

$\sim 10 \text{ fs}$

$$E_{\text{kin}} \sim 10^{-8} \text{ eV} \sim 10^{-4} \text{ K}$$

$$a \sim 10^{15} g$$

Vol 461 | 29 October 2009 | doi:10.1038/nature08481

nature

Acceleration of neutral atoms in strong short-pulse laser fields

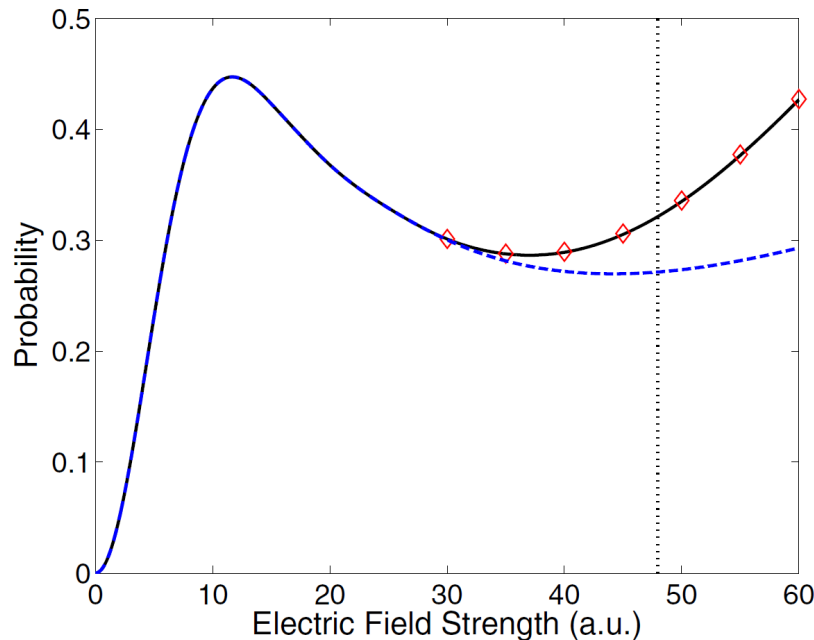
U. Eichmann^{1,2}, T. Nubbemeyer¹, H. Rottke¹ & W. Sandner^{1,2}

$$a_{\text{exp}} \sim 10^{14} g$$

$8 \times 10^{15} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$, $(700 - 1100) \text{ nm}$, $(40 - 100) \text{ fs}$, He, Ne atoms

Перспективные задачи: влияние недипольных эффектов на стабилизацию атомов

95eV photons $\omega = 3.5$ a.u. ~ 10 fs



← nondipol corrections included
but CM coupling was not !!!

← dipol approximation

PHYSICAL REVIEW A **90**, 053411 (2014)

Nondipole ionization dynamics in atoms induced by intense xuv laser fields

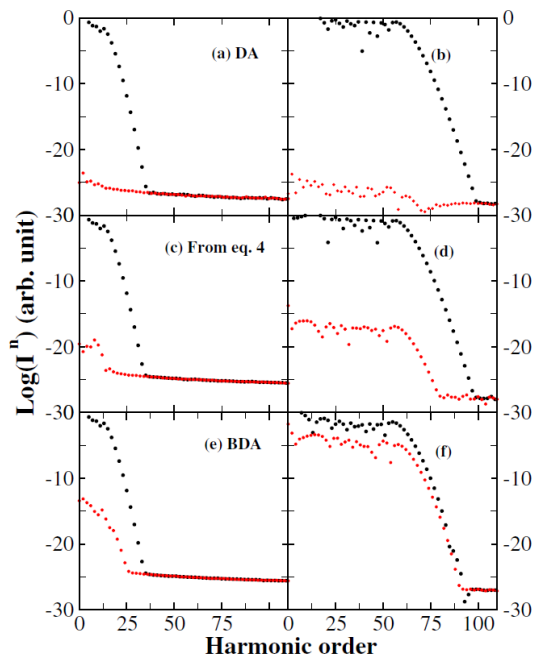
Morten Førre^{*} and Aleksander Skjerlie Simonsen[†]

Department of Physics and Technology, University of Bergen, N-5007 Bergen, Norway

Перспективные задачи: влияние недипольных эффектов на генерацию гармоник

модельная система $[\text{H}(\text{C}_2\text{H}_2)_{n_0}\text{H}]$

$3.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ $8.75 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ frequency 0.06 a.u. (760 nm)



недипольные поправки не
учитывают связь ЦМ с движением электрона

Eur. Phys. J. D (2012) 66: 169
DOI: 10.1140/epjd/e2012-20750-0

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL D

**Breakdown of dipole approximation and its effect
on high harmonic generation**

R. Mishra, D.J. Kalita, and A.K. Gupta^a

Department of Chemistry, Indian Institute of Technology, Guwahati, 781039 Assam, India

Заключение & перспективы

- ИКИ дает уникальные возможности для экспериментального изучения важных недипольных эффектов при взаимодействии атома с монохроматическим ЭМ полем
- наработан существенный задел для теоретического анализа недипольных эффектов (движения ядер) во взаимодействии атомов с излучением ИКИ

V Melezhik, J. Phys. A56, 154003 (2023)

S Shadmehri & V Melezhik, Laser Phys. 33, 026001 (2023)