

Квантово-квазиклассический метод в физике малочастичных систем

В.С. Мележик

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Дубна



Работа поддержана РФФ, грант 075-10-2020-117

quantum-quasiclassical approach -> FBS

VOLUME 84, NUMBER 9

PHYSICAL REVIEW LETTERS

28 FEBRUARY 2000

Quantum Energy Flow in Atomic Ions Moving in Magnetic Fields

V. S. Melezhik^{1,*} and P. Schmelcher²

PHYSICAL REVIEW A **69**, 032709 (2004)

Stripping and excitation in collisions between p and $\text{He}^+(n \leq 3)$ calculated by a quantum time-dependent approach with semiclassical trajectories

Vladimir S. Melezhik,^{1,*} James S. Cohen,² and Chi-Yu Hu¹

Hyperfine Interactions **138**: 351–354, 2001.

Recent Progress in Treatment of Sticking and Stripping with Time-Dependent Approach

VLADIMIR S. MELEZHNIK^{1,2}

PHYSICAL REVIEW A **103**, 053109 (2021)

Improving efficiency of sympathetic cooling in atom-ion and atom-atom confined collisions

Vladimir S. Melezhik 

Eur. Phys. J. A (2022) 58:34
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00684-z>

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL A

Investigation of low-lying resonances in breakup of halo nuclei within the time-dependent approach

Dinara Valiolda^{1,2,3}, Daniyar Janseitov^{1,2,3,a} , Vladimir Melezhik^{3,4,b}

hydrogen atom + EM pulse

- **Nondipole effects (NDE) in interaction of atoms with short-wave EM radiation**
- **NDE → nonseparability of CM and electron variables**  **acceleration**
- **Mechanisms for acceleration of neutral atoms by EM pulses**
- **Acceleration and «twisting» of atoms by circularly polarized EM pulse**

hydrogen atom + EM pulse

- Nondipole effects (NDE) in interaction of atoms with short-wave EM radiation
- NDE → nonseparability of CM and electron variables → acceleration
- Mechanisms for acceleration of neutral atoms by EM pulses
- Acceleration and «twisting» of atoms by circularly polarized EM pulse

↓

electron vortex beams to study: chirality, magnetization mapping,
transfer of angular momentum to nanoparticles ...

hydrogen atom + EM pulse

- Nondipole effects (NDE) in interaction of atoms with short-wave EM radiation
- NDE → nonseparability of CM and electron variables → acceleration
- Mechanisms for acceleration of neutral atoms by EM pulses
- Acceleration and «twisting» of atoms by circularly polarized EM pulse



electron vortex beams to study: chirality, magnetization mapping,
transfer of angular momentum to nanoparticles ...

several proposals to create vortex beams of composite particles
(neutrons, protons and atoms)

hydrogen atom + EM pulse

- Nondipole effects (NDE) in interaction of atoms with short-wave EM radiation
- NDE → nonseparability of CM and electron variables → acceleration
- Mechanisms for acceleration of neutral atoms by EM pulses
- Acceleration and «twisting» of atoms by circularly polarized EM pulse



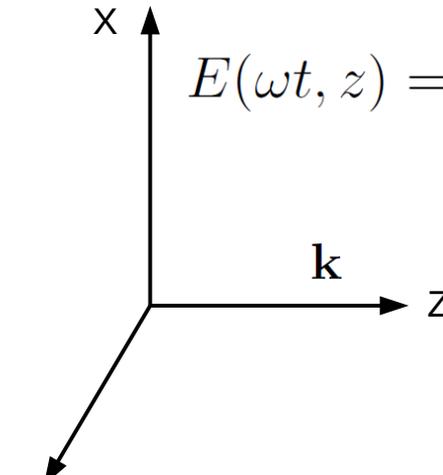
electron vortex beams to study: chirality, magnetization mapping,
transfer of angular momentum to nanoparticles ...

several proposals to create vortex beams of composite particles
(neutrons, protons and atoms)

- Conclusion & perspectives

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом

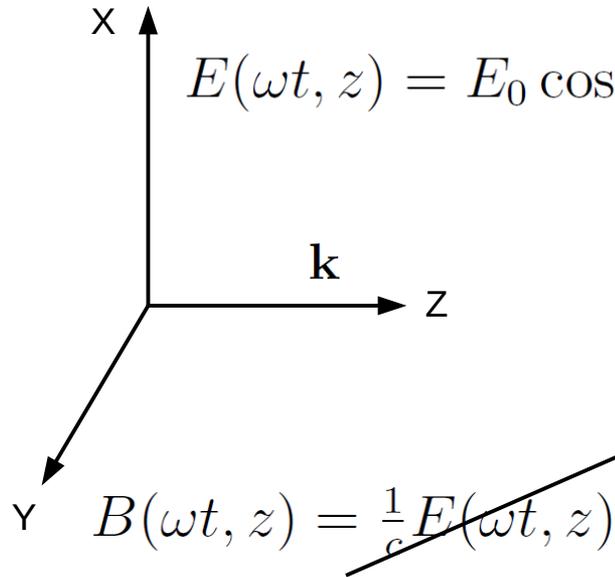

$$E(\omega t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \frac{\omega}{c}z)$$
$$B(\omega t, z) = \frac{1}{c}E(\omega t, z) \qquad \frac{1}{c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

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

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

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом

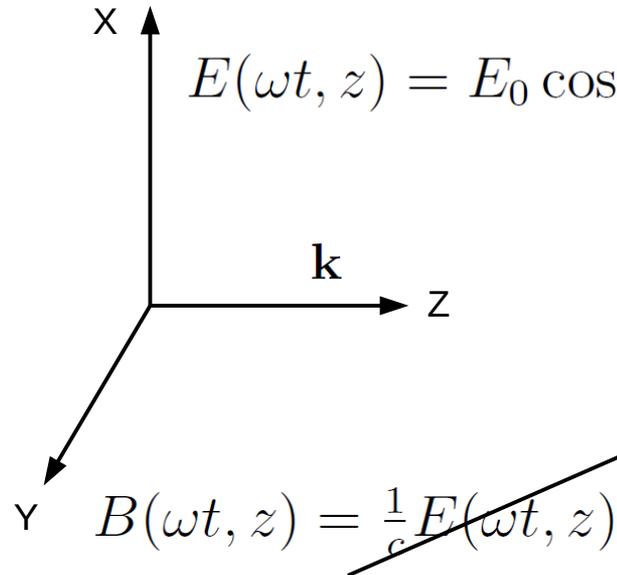

$$E(\omega t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos(\omega t - \cancel{\frac{\omega}{c}z})$$
$$B(\omega t, z) = \cancel{\frac{1}{c}E(\omega t, z)} \qquad \frac{1}{c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

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

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

Недипольные эффекты

Электромагнитная волна + атом


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

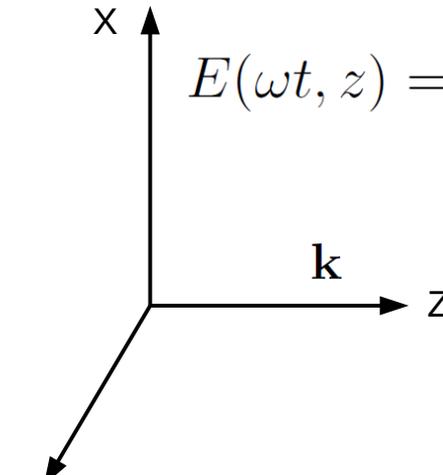
оптический диапазон $\lambda \sim 500\text{nm}$ $\omega \sim 10^{-1}a.u.$

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

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


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

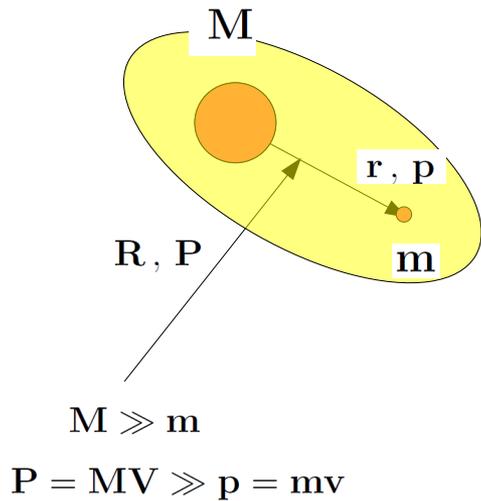
оптический диапазон $\lambda \sim 500\text{nm}$ $\omega \sim 10^{-1}a.u.$

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

~~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)



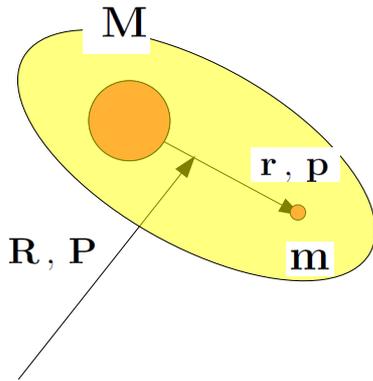
$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)$$

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

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

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

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



$$M \gg m$$

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

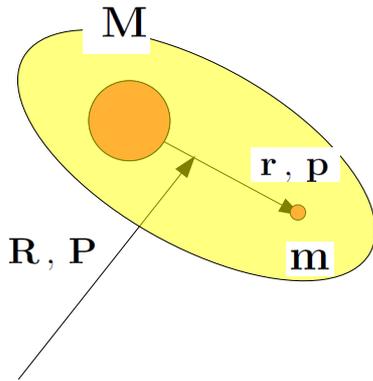
$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + \boxed{h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)}$$

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

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

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

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



$$M \gg m$$

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

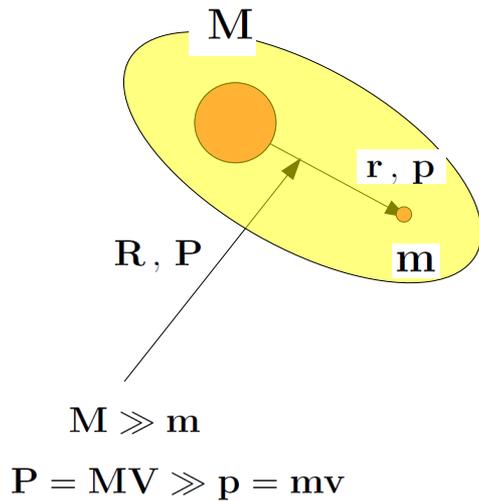
$$H(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + \boxed{h_0(\mathbf{r}) + V_1(\mathbf{r}, t) + V_2(\mathbf{r}, \mathbf{R}, t)}$$

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

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

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

Атом водорода в сильном лазерном поле (недипольные эффекты)



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

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

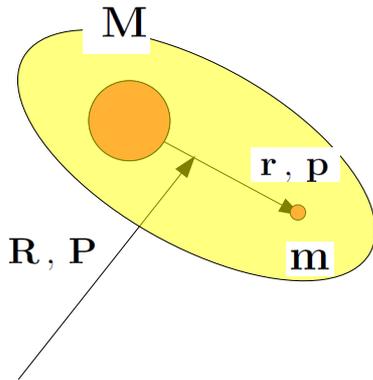
$$V_1(\mathbf{r}) = E_0 f(t) \left\{ \cos(\omega t) x + \frac{1}{c} [\cos(\omega t) \hat{l}_y + \omega \sin(\omega t) xz] \right\},$$

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



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

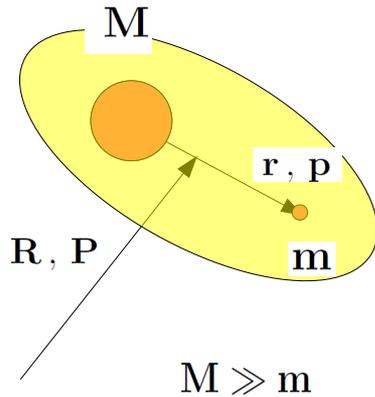
$$\mathbf{P} = M\mathbf{V} \gg \mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

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

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

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{MV} \rightarrow 0$$

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

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

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

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

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

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

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

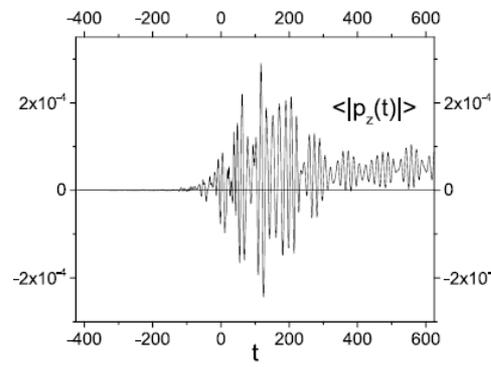
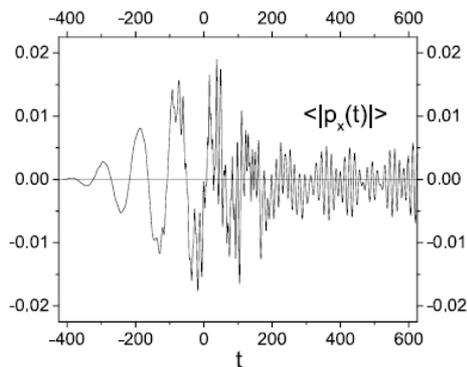
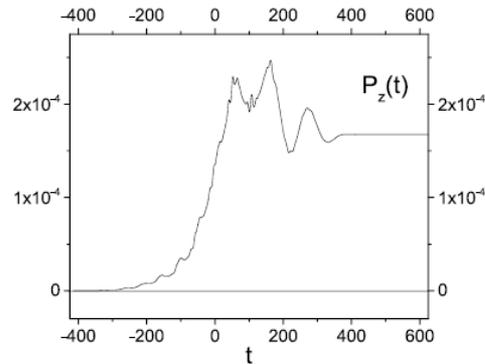
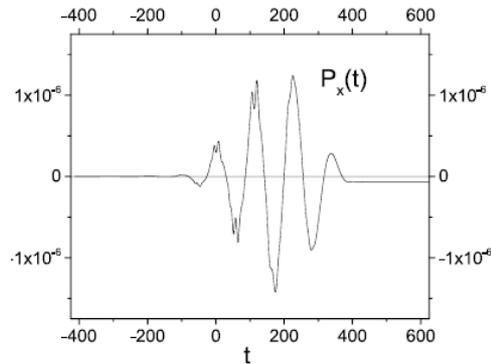
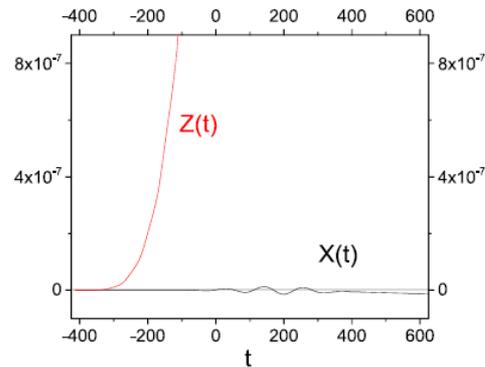
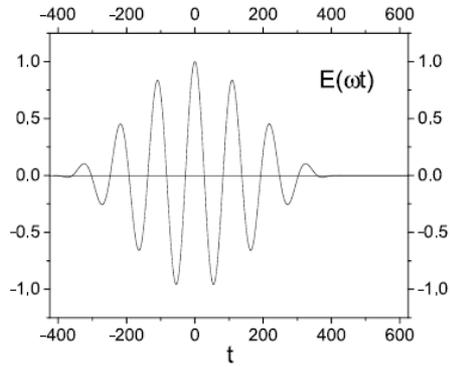
Abstract

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)

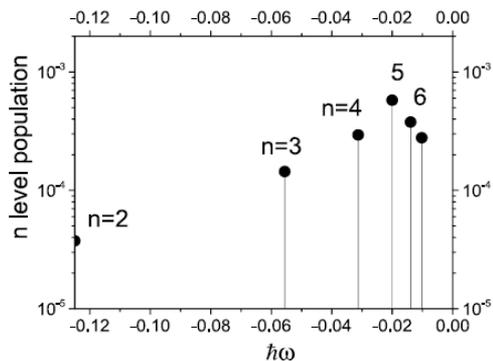
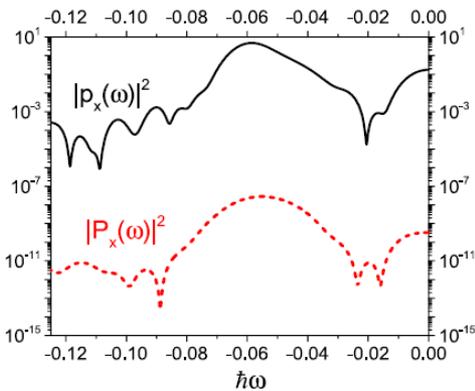
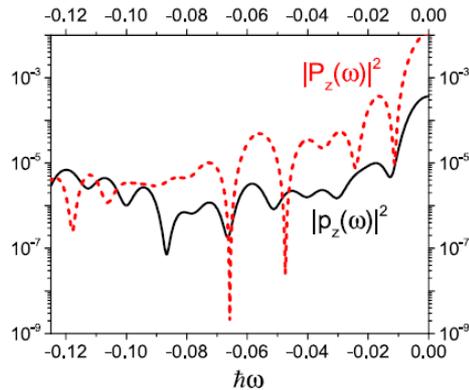
$$\lambda = 800 \text{ nm } (\omega = 0.057 \text{ a.u.})$$

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



Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

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



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

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

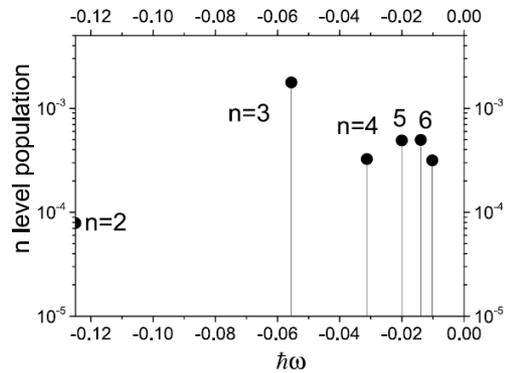
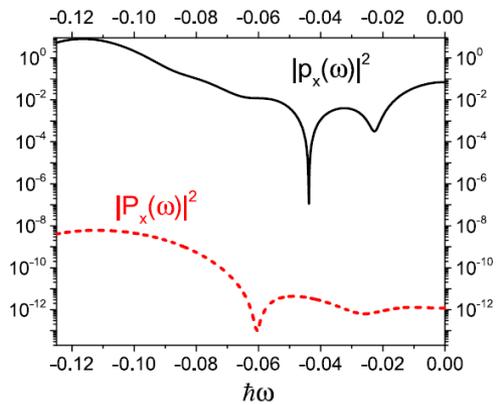
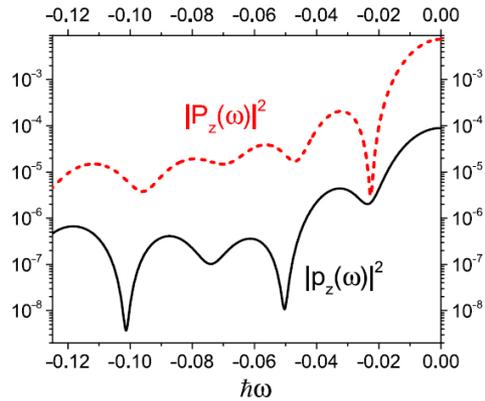
$$P_s(\omega) = \int_{T_{in}}^{T_{out}} P_s(t) e^{i\omega t} dt,$$

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

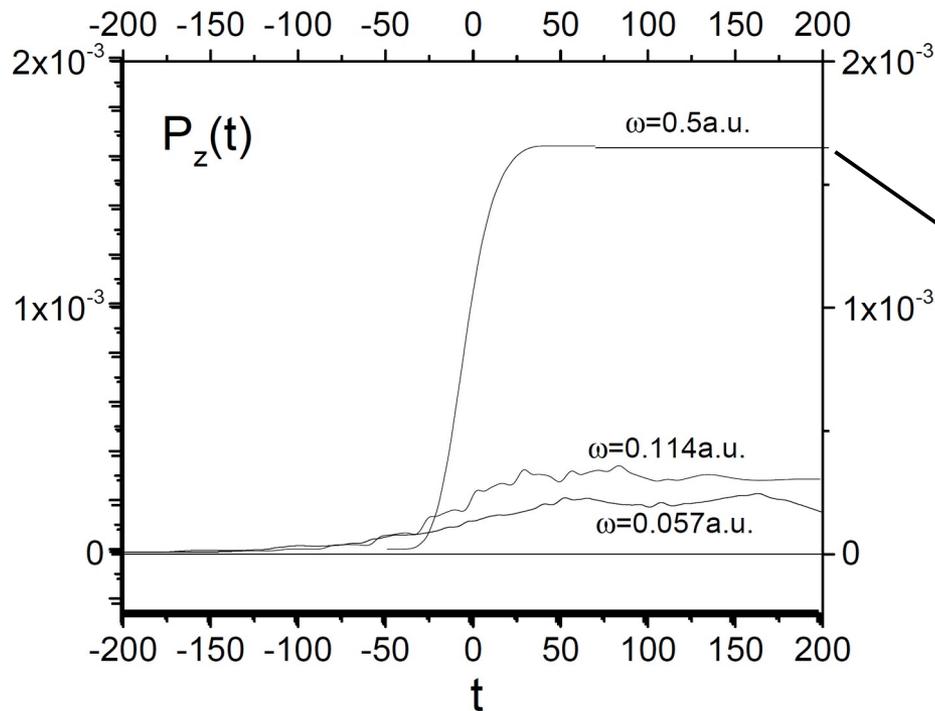
$$\langle |p_s(t)| \rangle = \int \psi^*(\mathbf{r}, t) \hat{p}_s \psi(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}.$$

Атом водорода в сильном лазерном поле (результаты расчетов)

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



Перспективные задачи: ускорение атомов ИКИ



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

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

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

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

Механизмы ускорения атомов ЭМ импульсами



Article

Acceleration of Neutral Atoms by Strong Short-Wavelength Short-Range Electromagnetic Pulses

Vladimir S. Melezhik ^{1,2,*}  and Sara Shadmehri ^{1,*} 

¹ Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region 141980, Russian Federation

² Dubna State University, 19 Universitetskaya Street, Dubna, Moscow Region 141982, Russian Federation

* Correspondence: melezhik@theor.jinr.ru (V.S.M.); shadmehri@theor.jinr.ru (S.S.)

Citation: Melezhik, V.S.; Shadmehri,

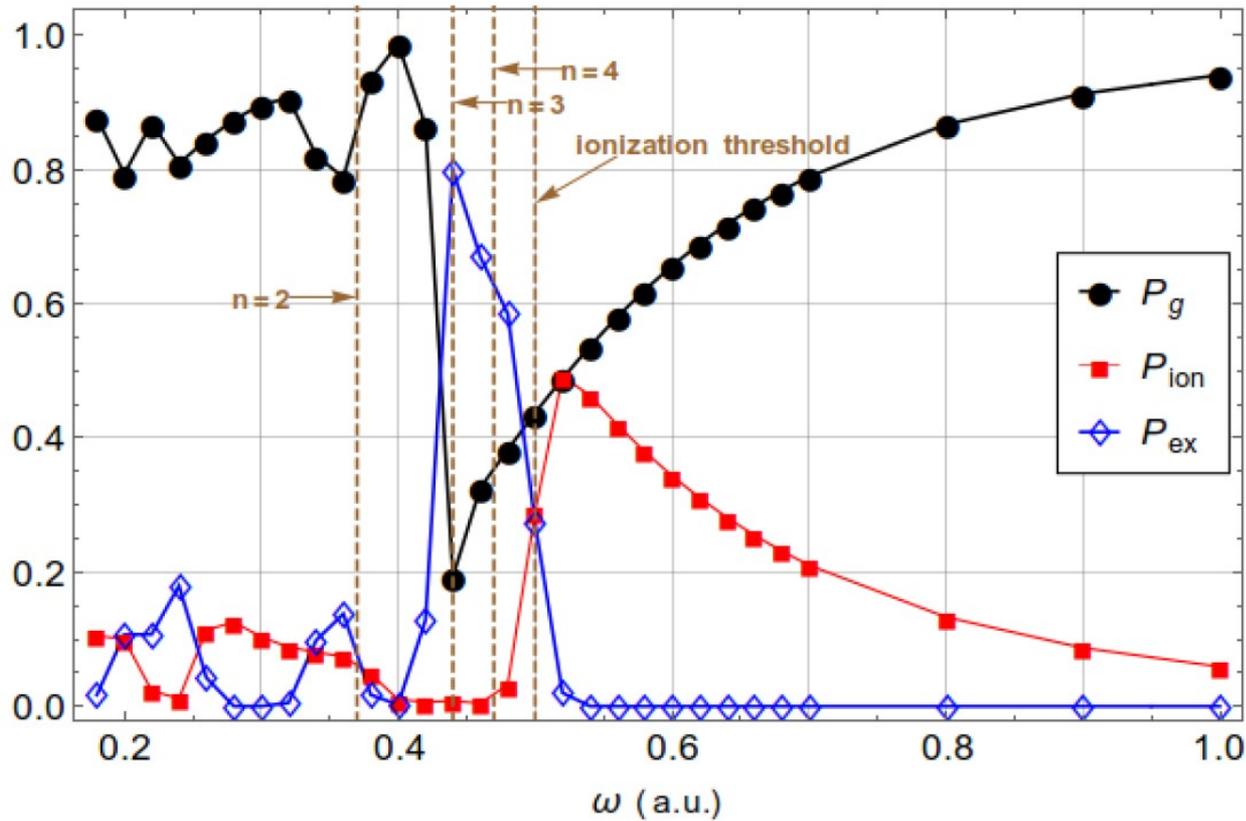
S. Acceleration of Neutral Atoms by

Strong Short-Wavelength

Short-Range Electromagnetic Pulses.

Photonics **2023**, *10*, 1290. [https://](https://doi.org/10.3390/photonics10121290)

doi.org/10.3390/photonics10121290

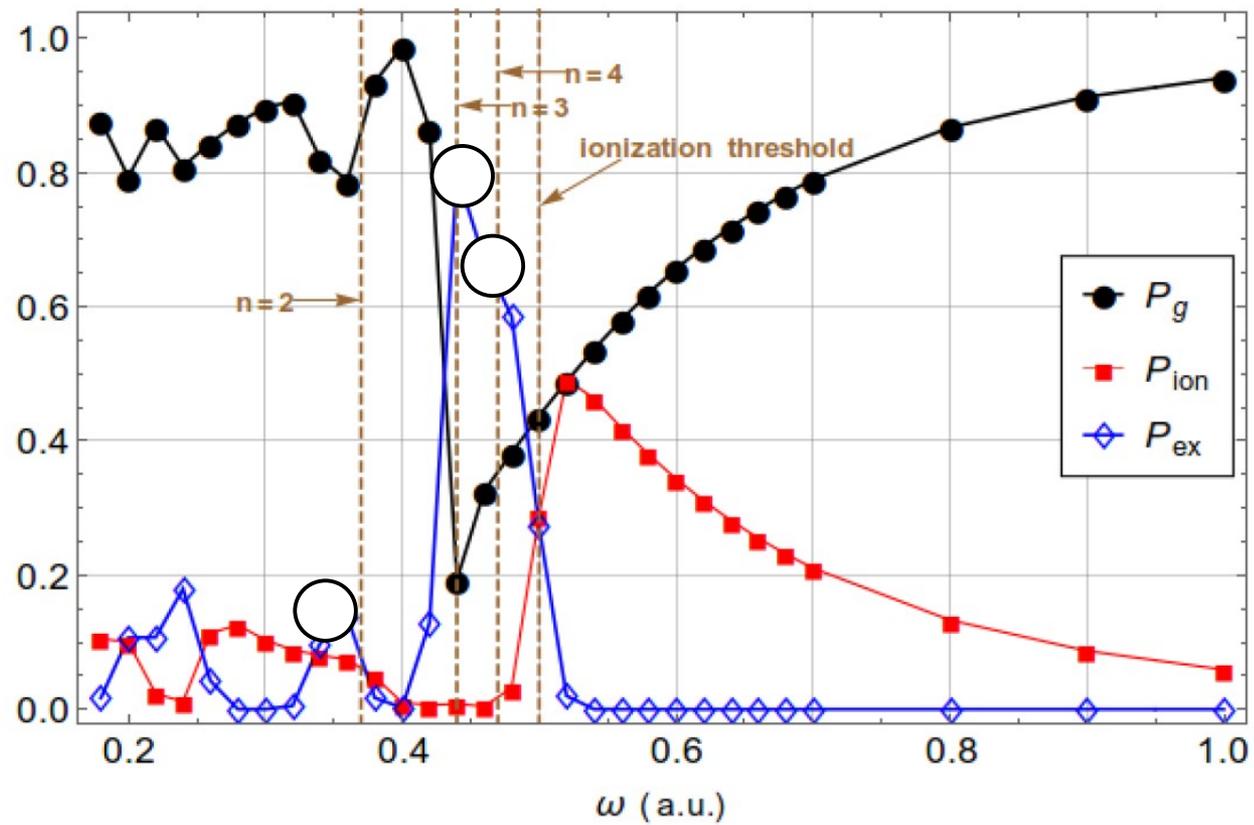


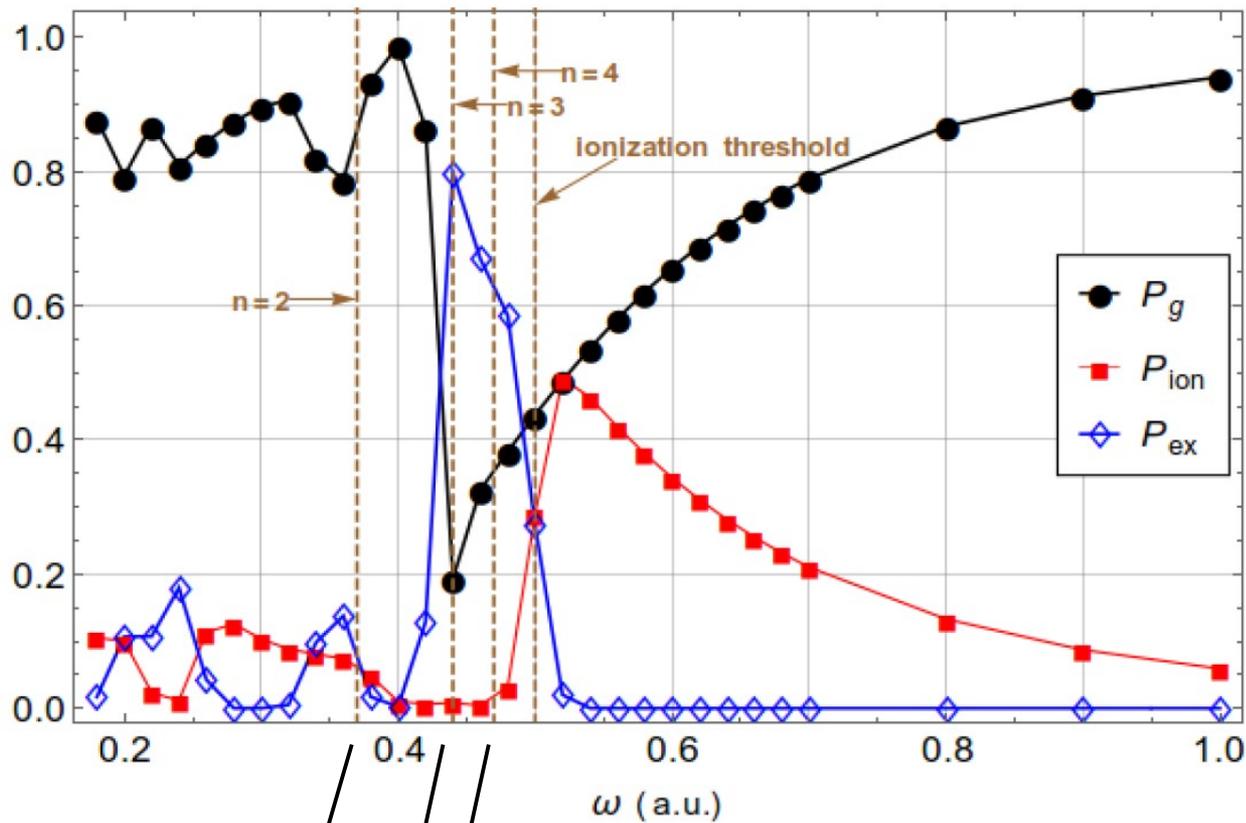
$$P_g(\omega) = |\langle \psi | \phi_{100} \rangle|^2 = \left| \int \psi(\mathbf{r}, \omega, T_{out}) \phi_{100}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2$$

$$P_{ex} = \sum_{n=2}^{\infty} P_n = \sum_{n=2}^{N'} P_n + \sum_{n=N'+1}^{\infty} P_n$$

$$P_{ion} = \int_0^{+\infty} \frac{dP}{dE} dE$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} P_n + \int_0^{+\infty} \frac{dP}{dE} dE = 1$$

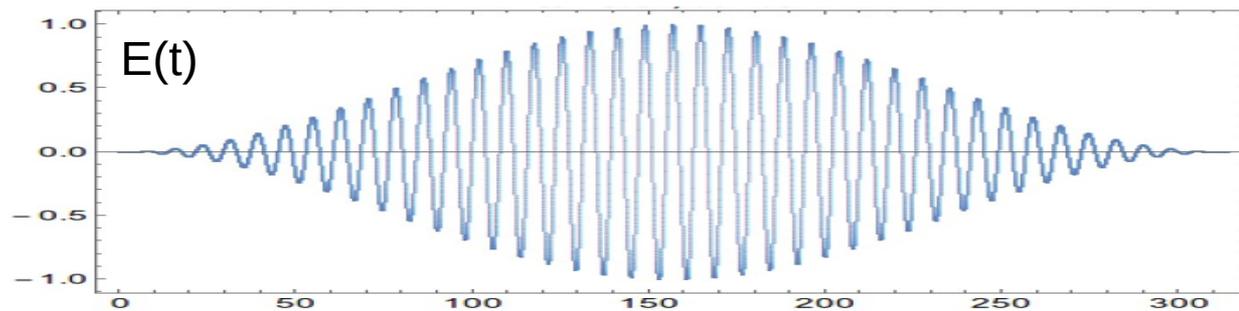
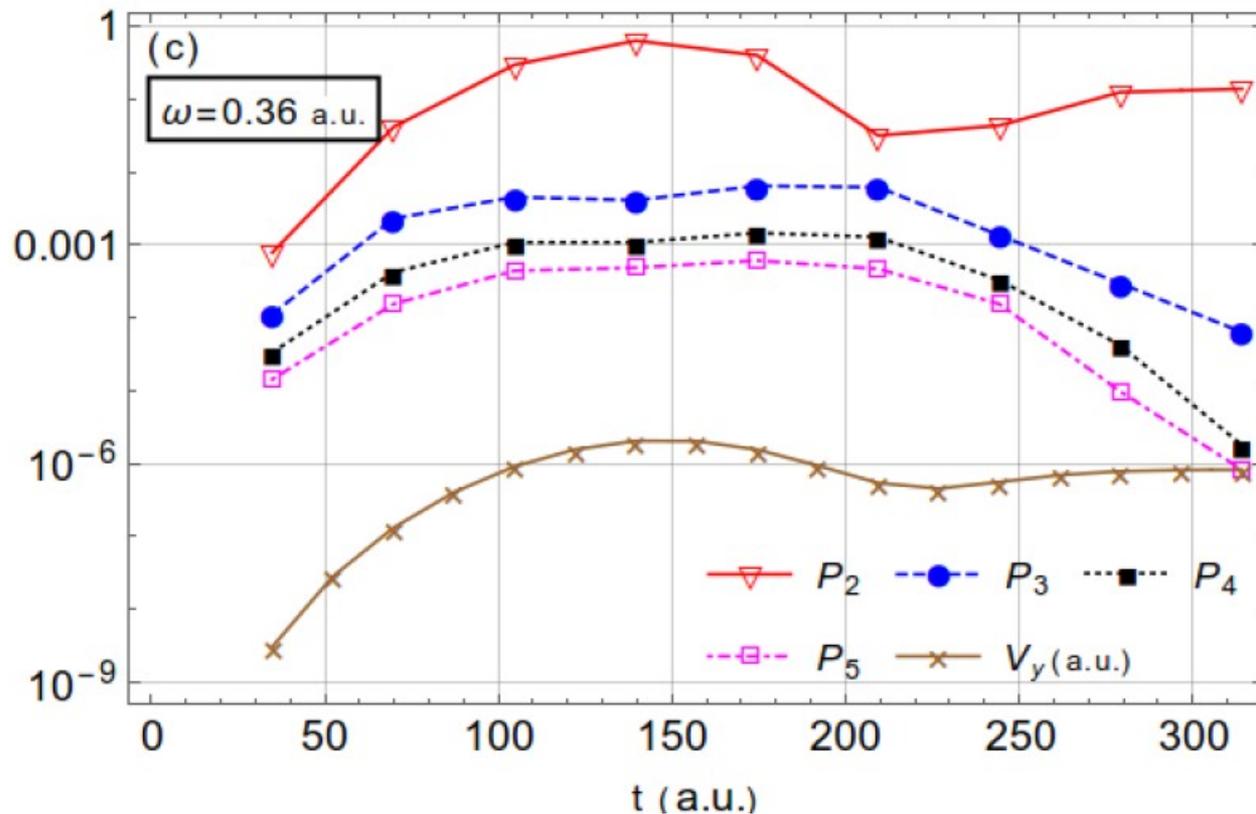




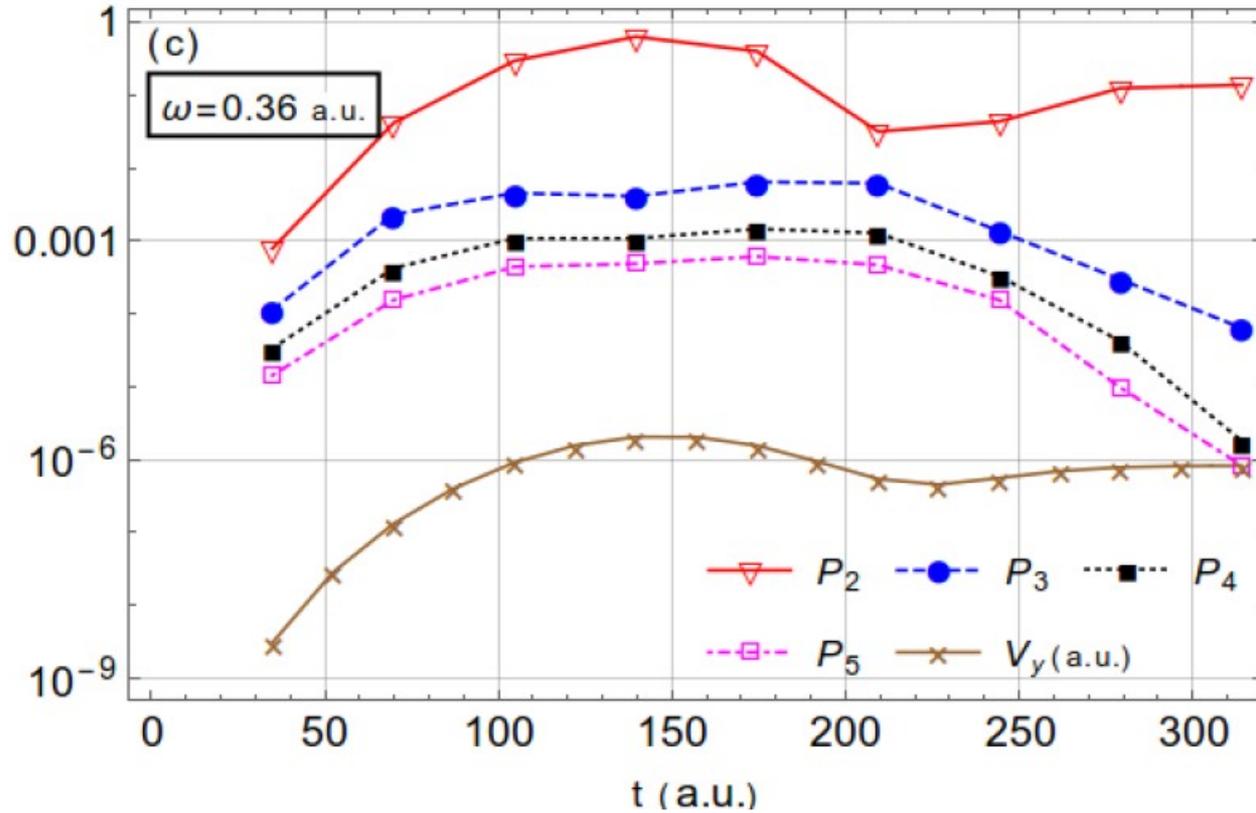
$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'}, \quad n' = 2, 3, 4$$

$$\hbar\omega = \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{2n'^2} \quad \omega = 0.38, 0.44, 0.47 \text{ (a.u.)}$$

$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$

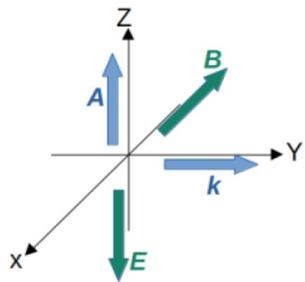
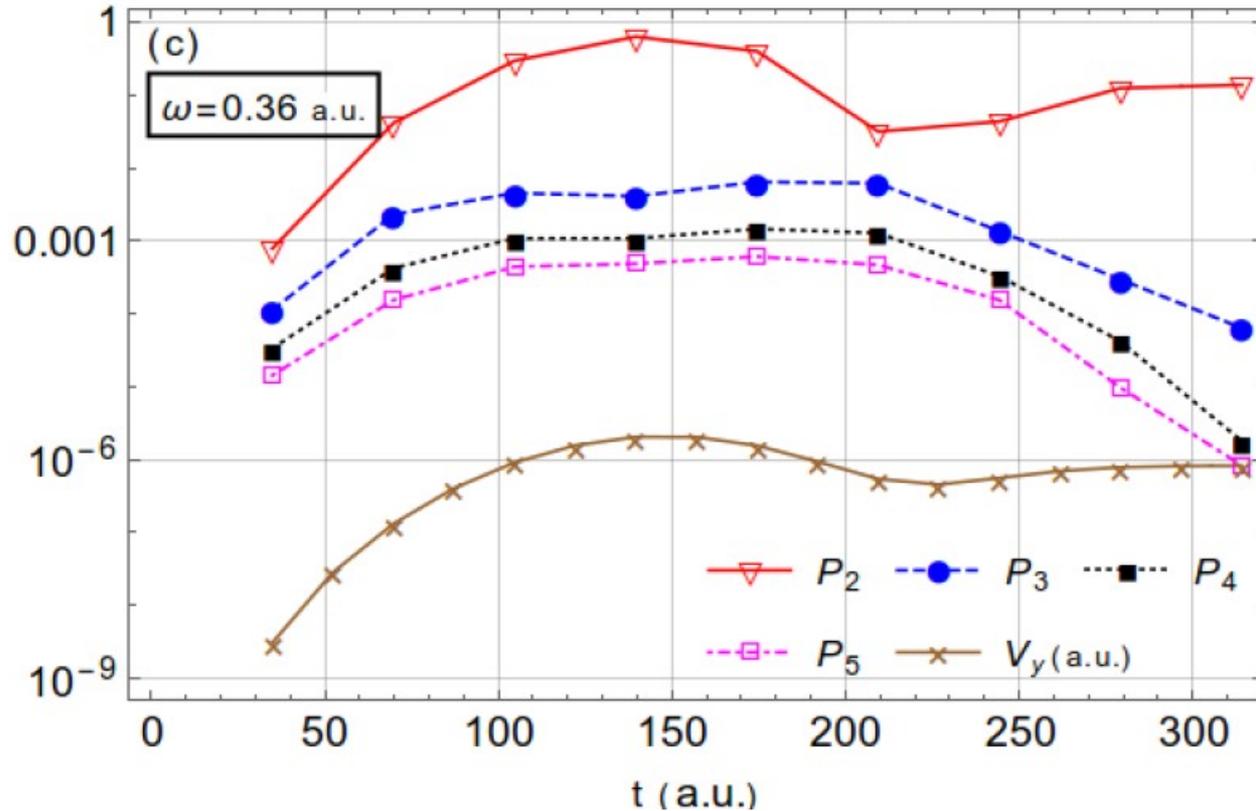


$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$



$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'}, \quad n' = 2,$$

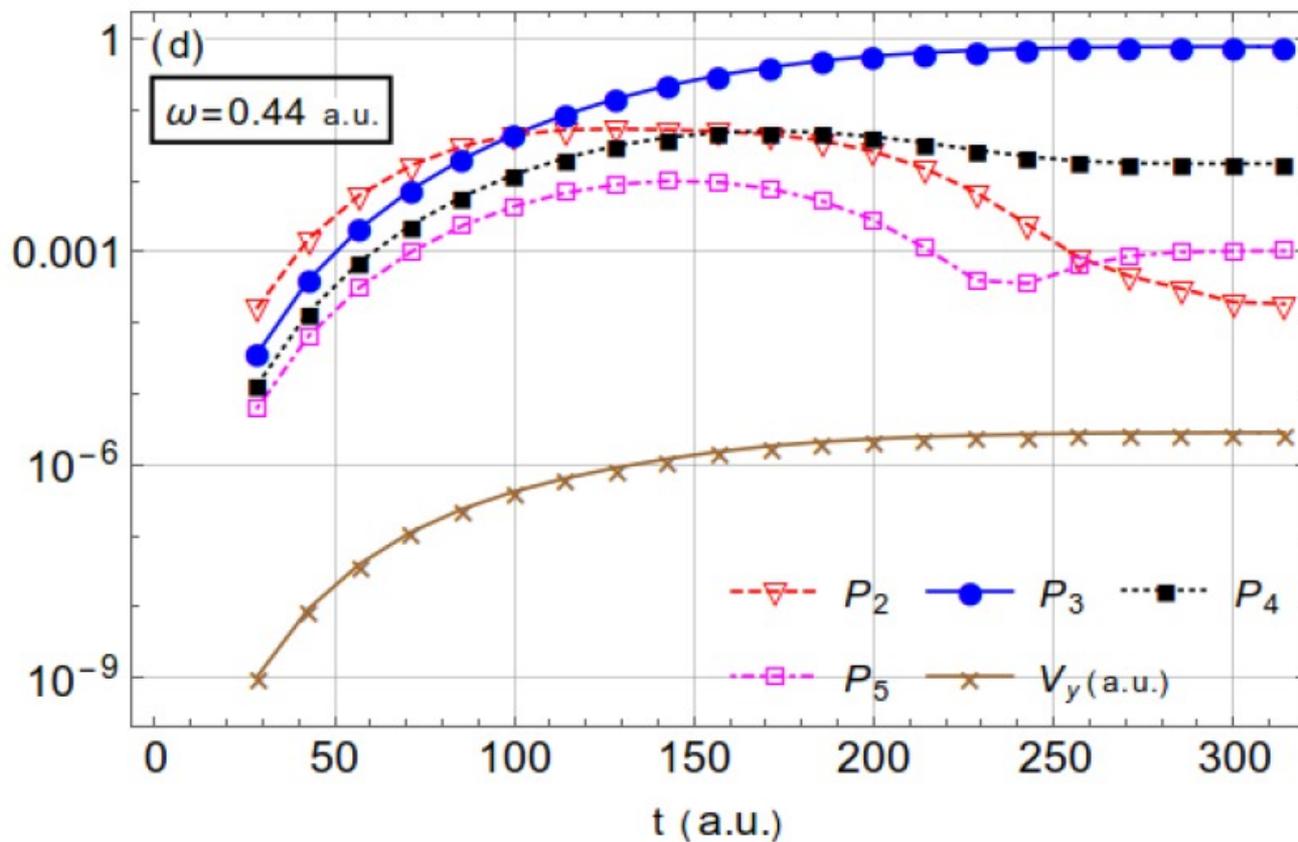
$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$



$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'}, \quad n' = 2,$$

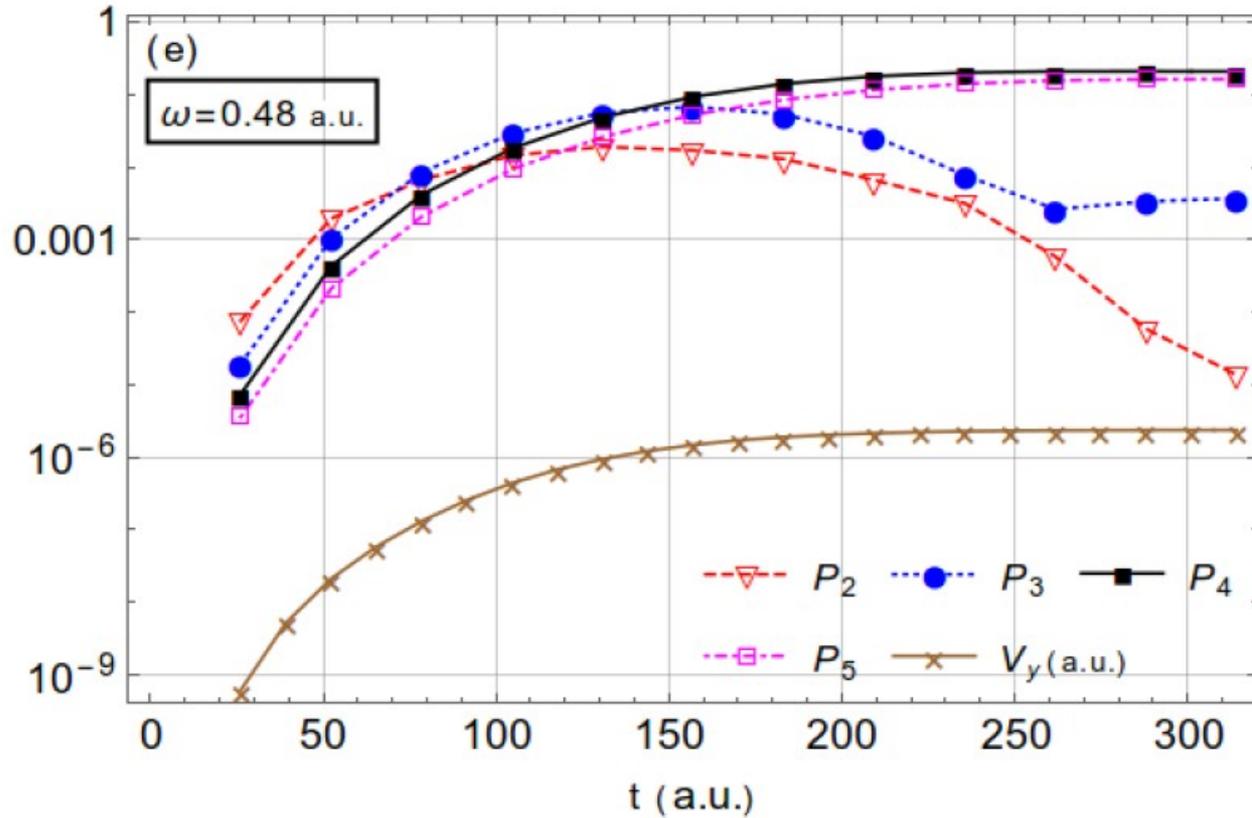
$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \hat{\mathbf{z}} \frac{E_0}{\omega} \sin^2\left(\frac{\pi t}{NT}\right) \sin(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$

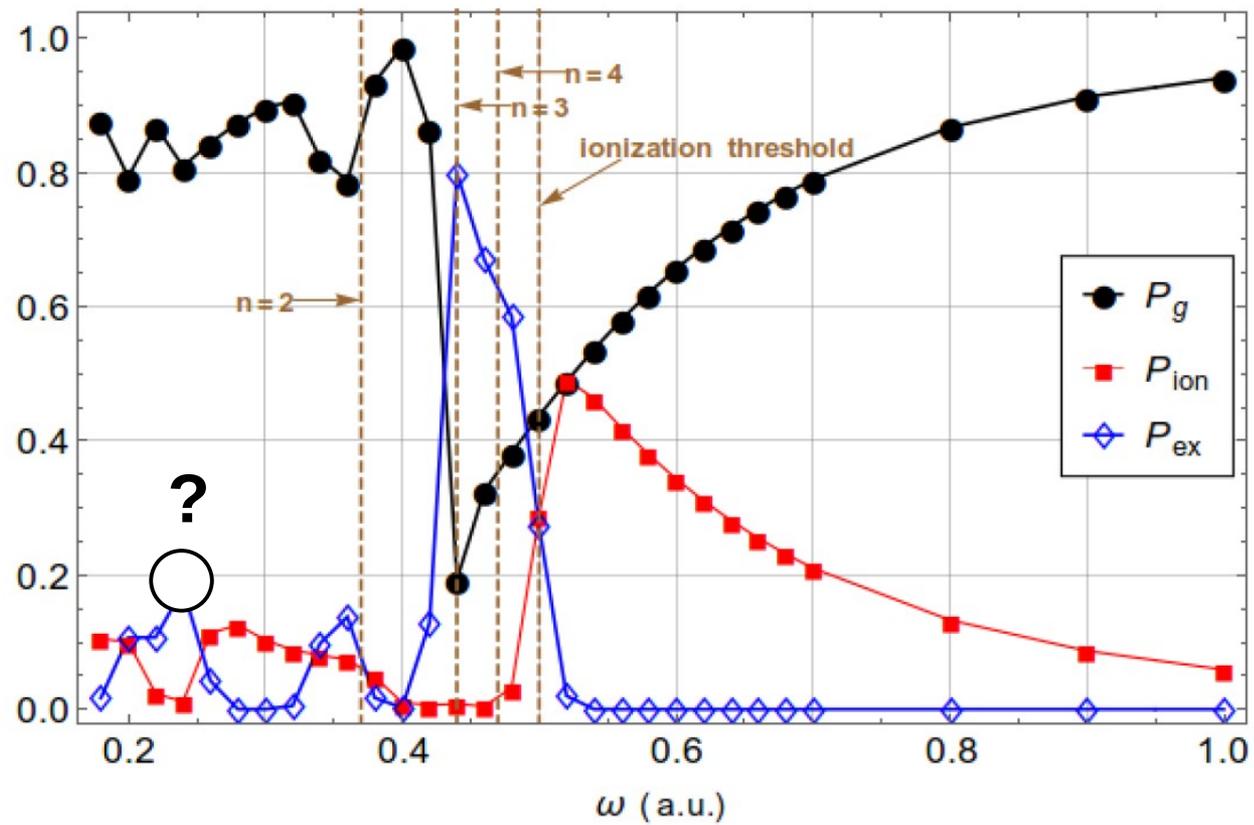


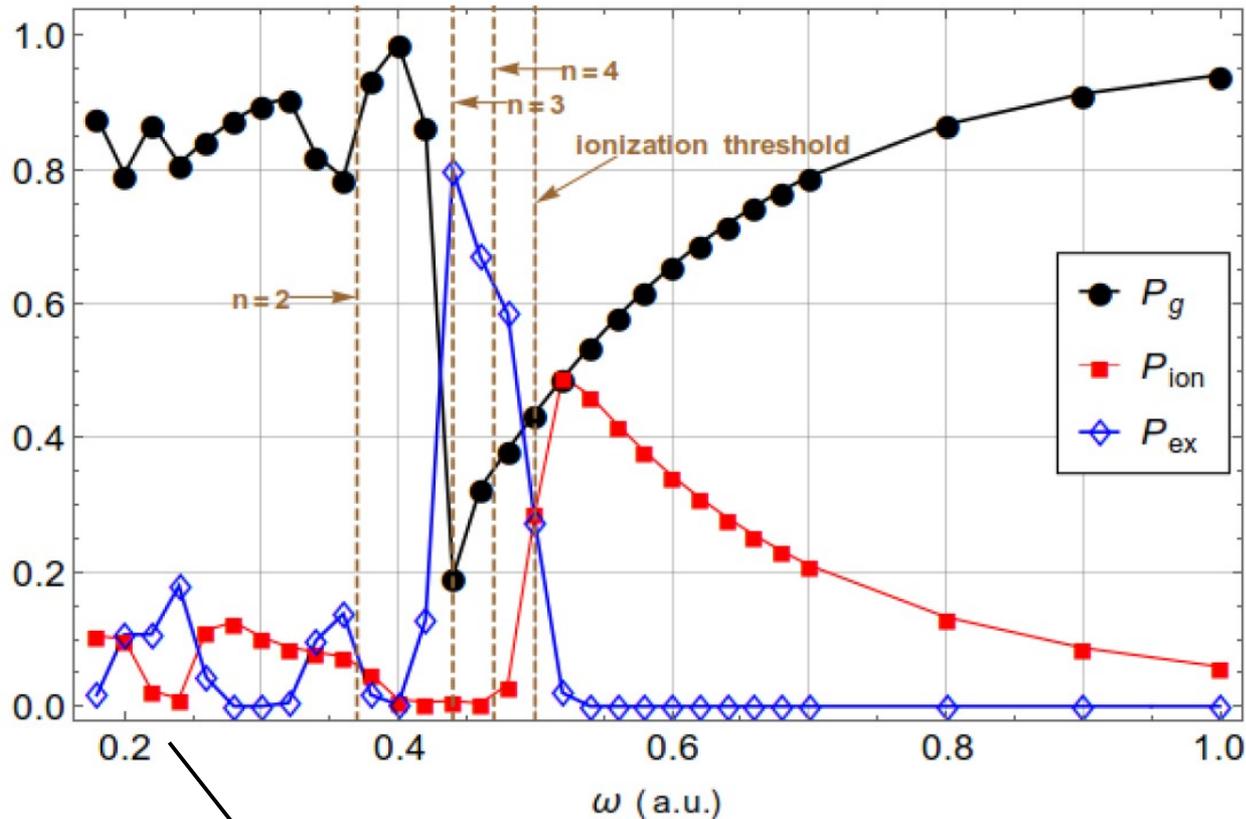
$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'} \quad n' = 3.$$

$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$



$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'} \quad n' = 4$$



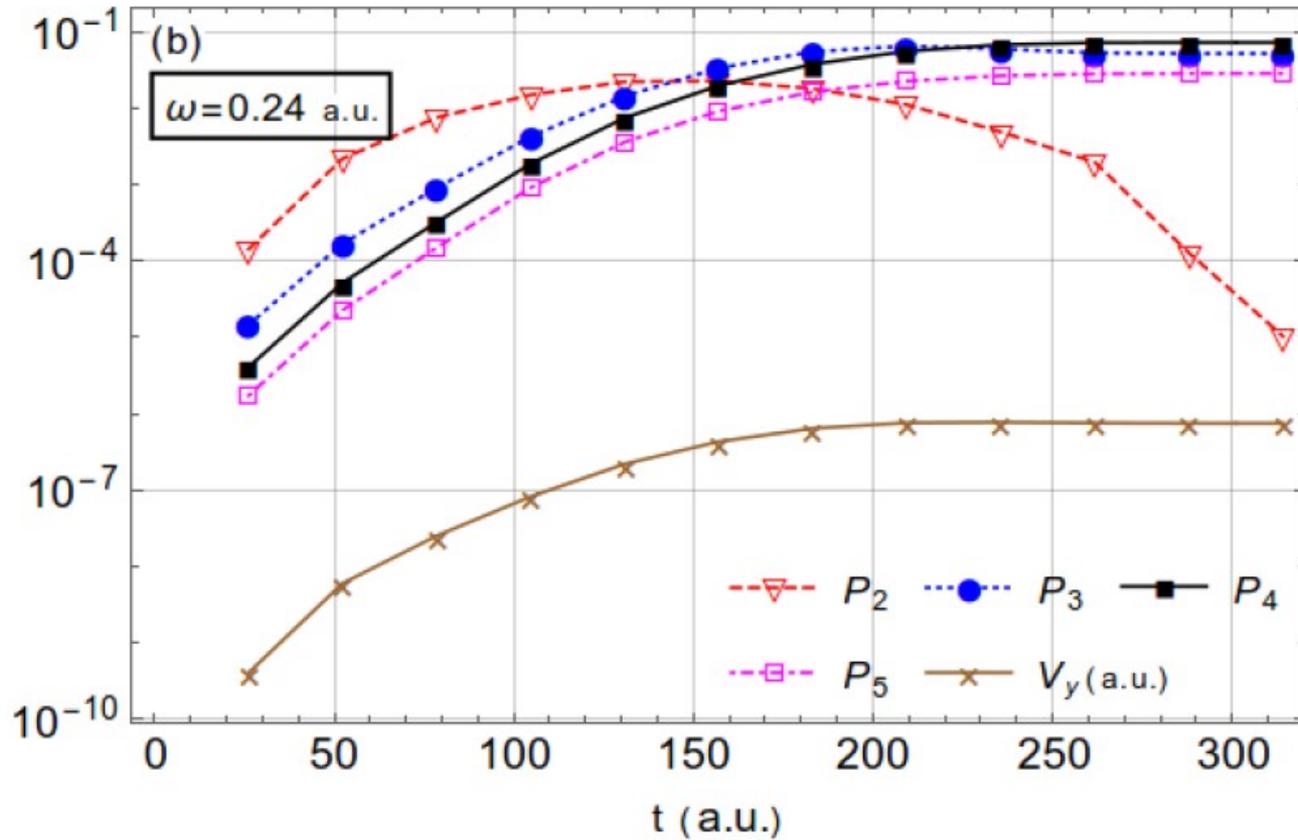


$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'} \quad 2\hbar\omega = \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{2n'^2}$$

two-photon transition $2\hbar\omega \approx 0.47$ a.u. for $n = 1$ and $n' = 4$

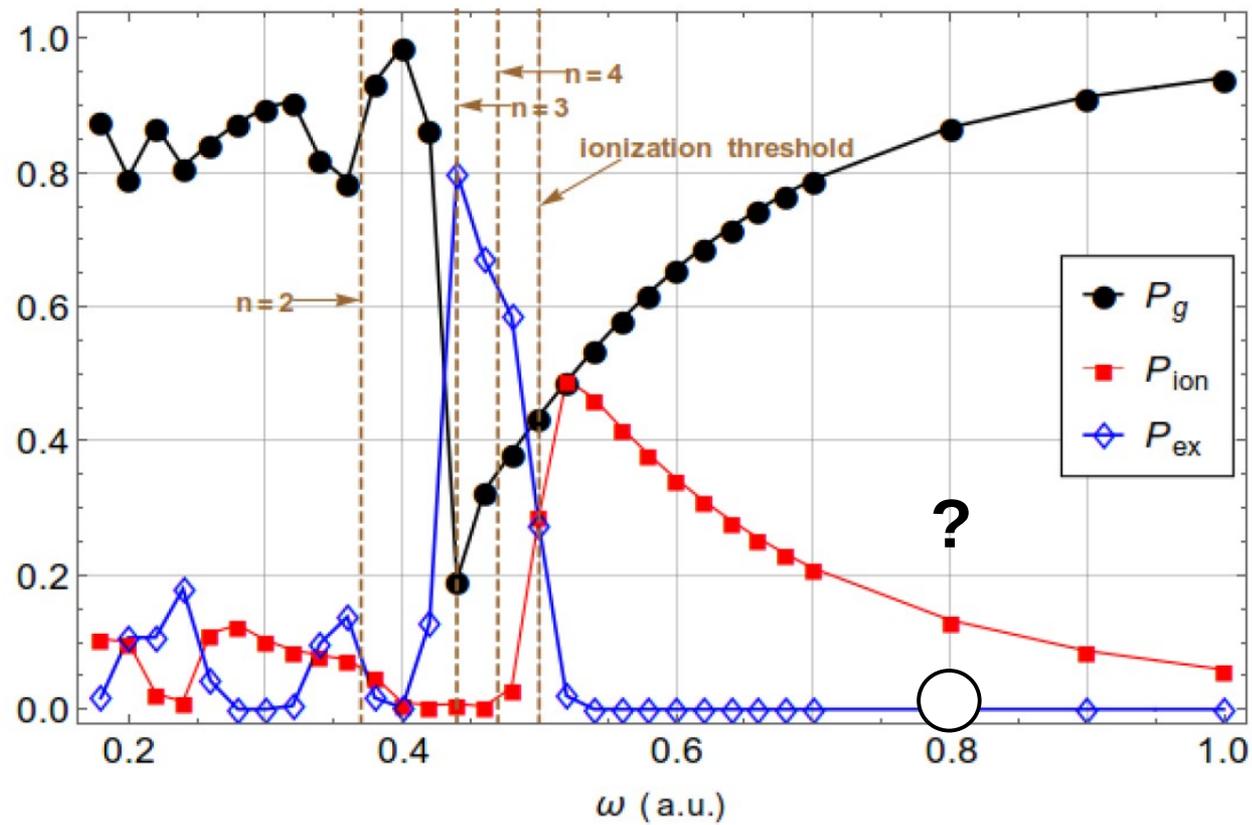
peak in $P_{ex}(\omega)$ at $\omega = 0.24$ a.u.

$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$

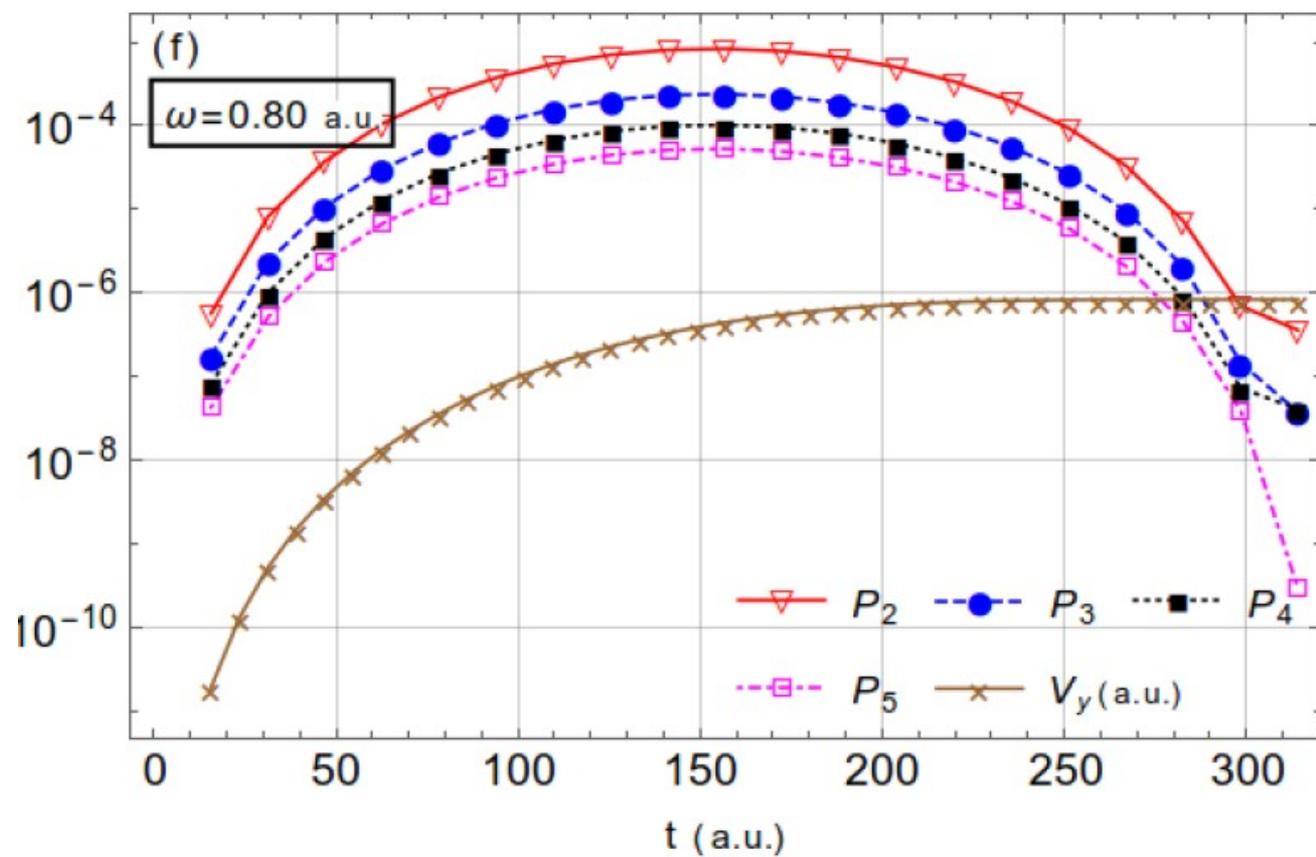


$$H_{n=1} + \hbar\omega \rightarrow H_{n'} \quad 2\hbar\omega = \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{2n'^2}$$

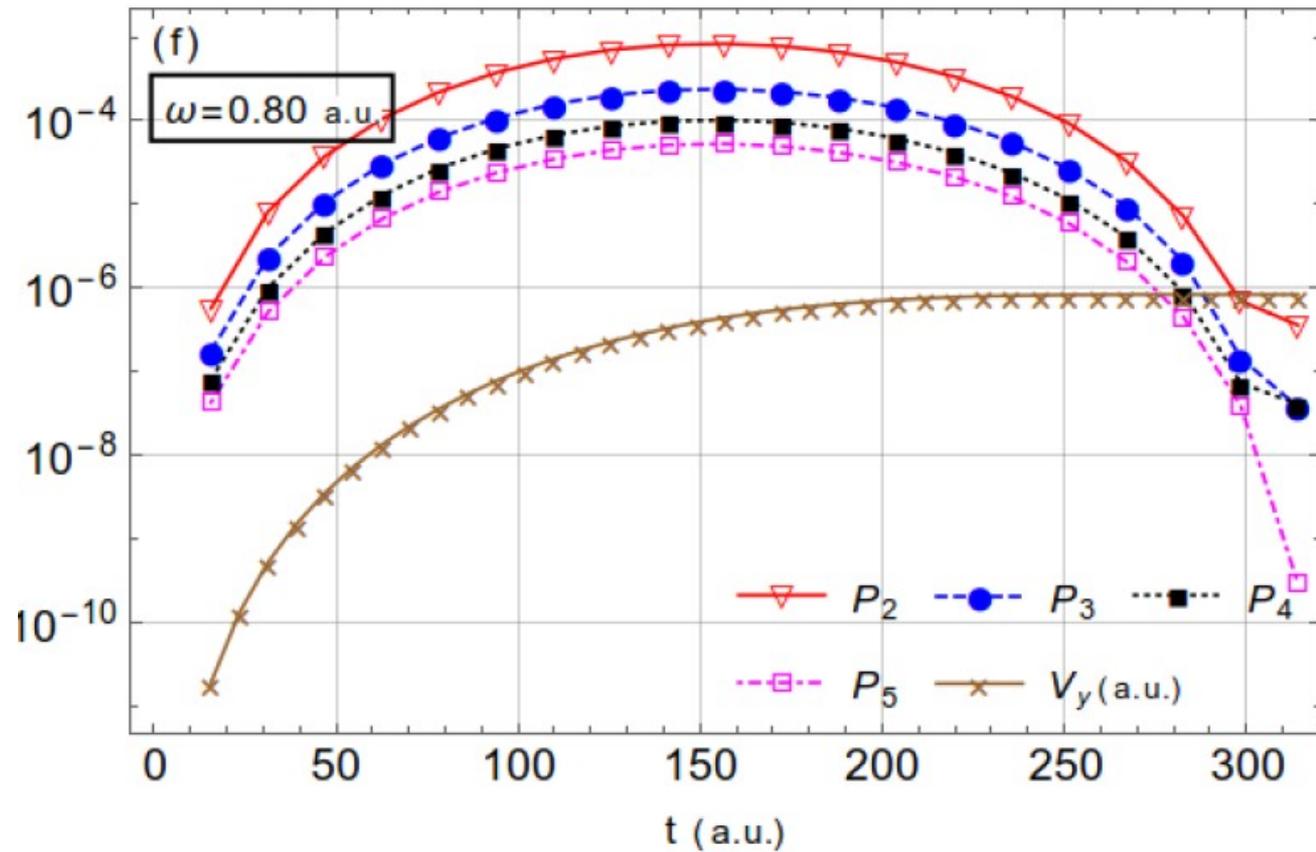
two-photon transition $2\hbar\omega \approx 0.47$ a.u. for $n = 1$ and $n' = 4$



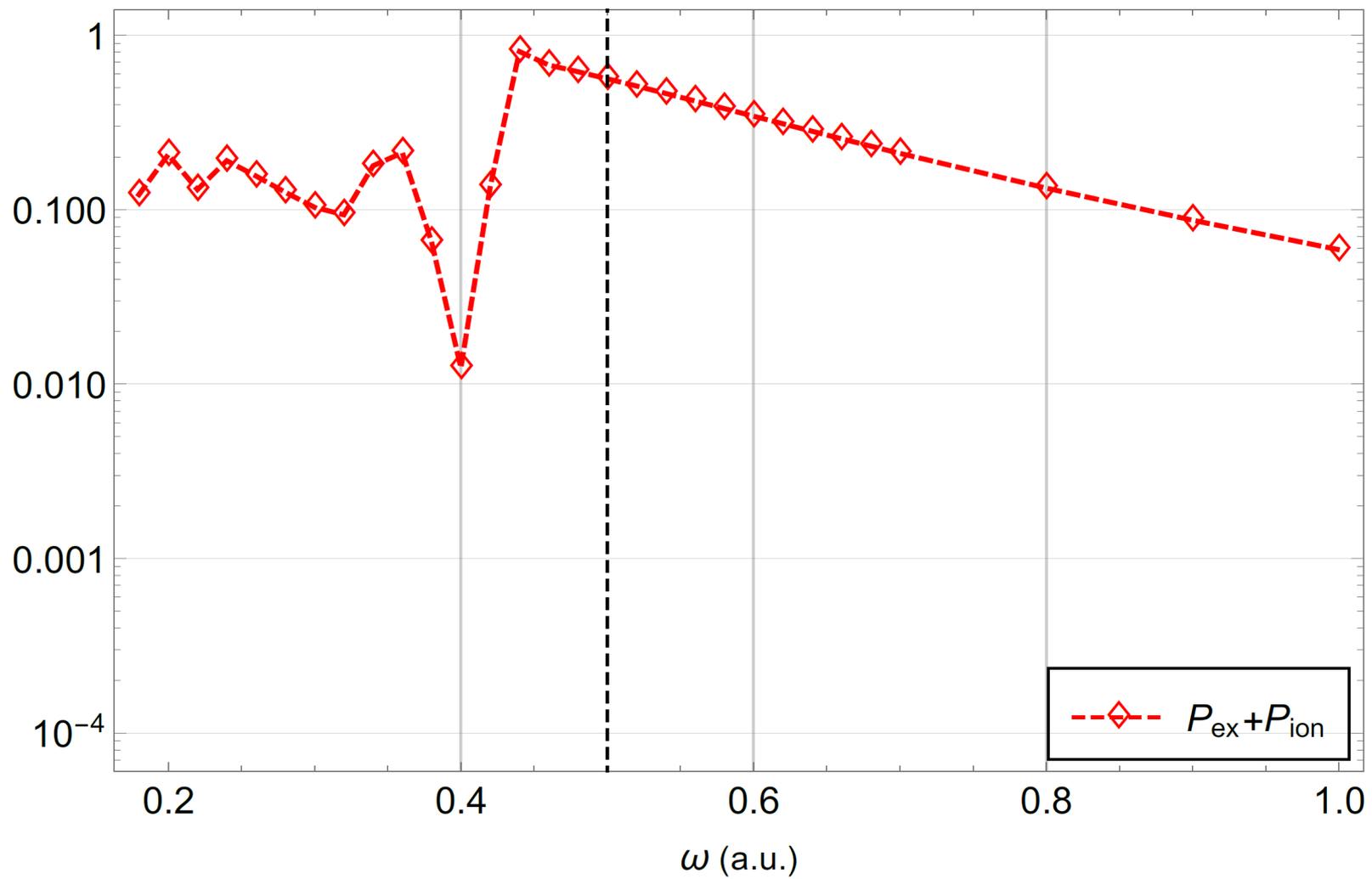
$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$

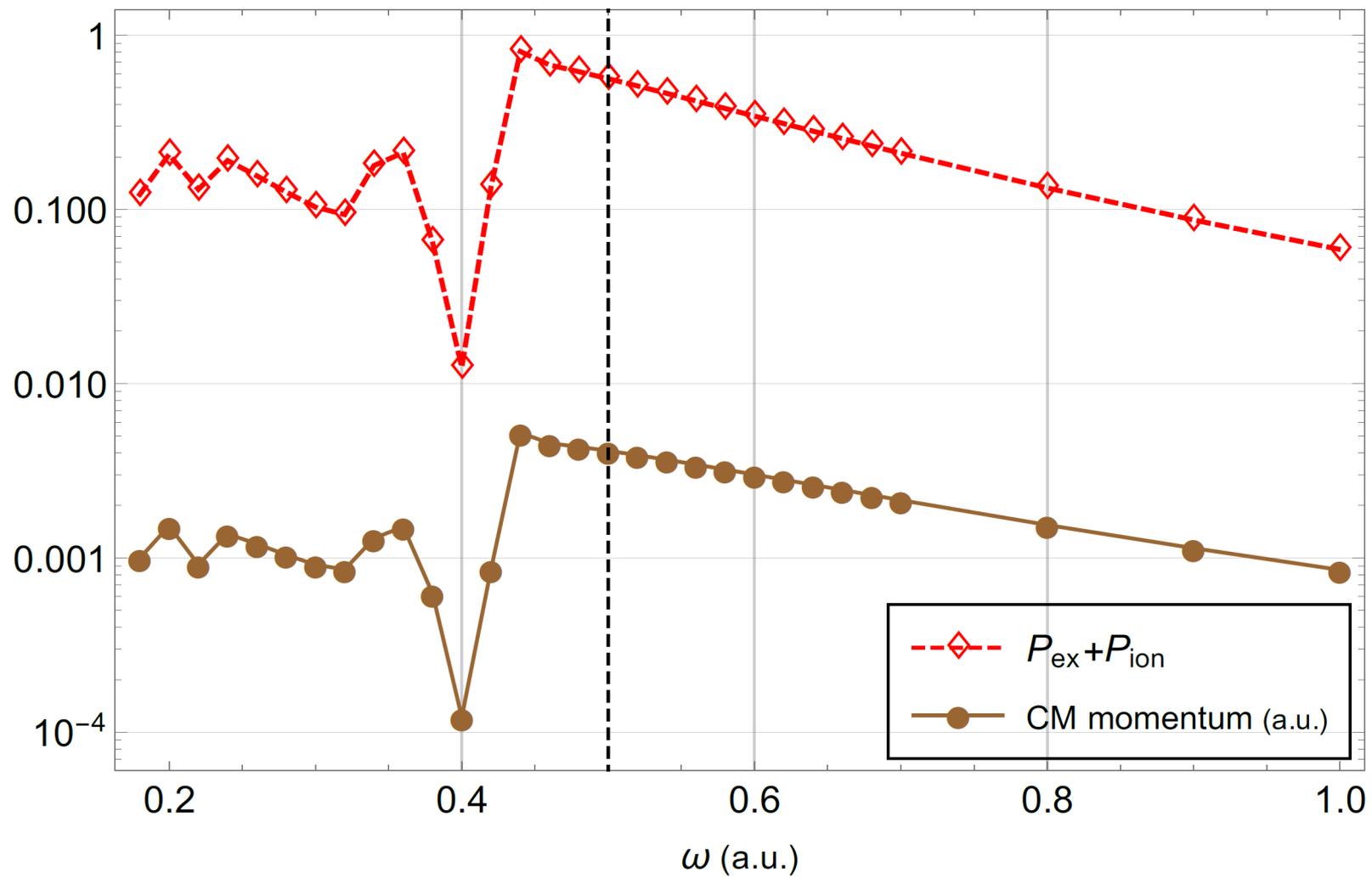


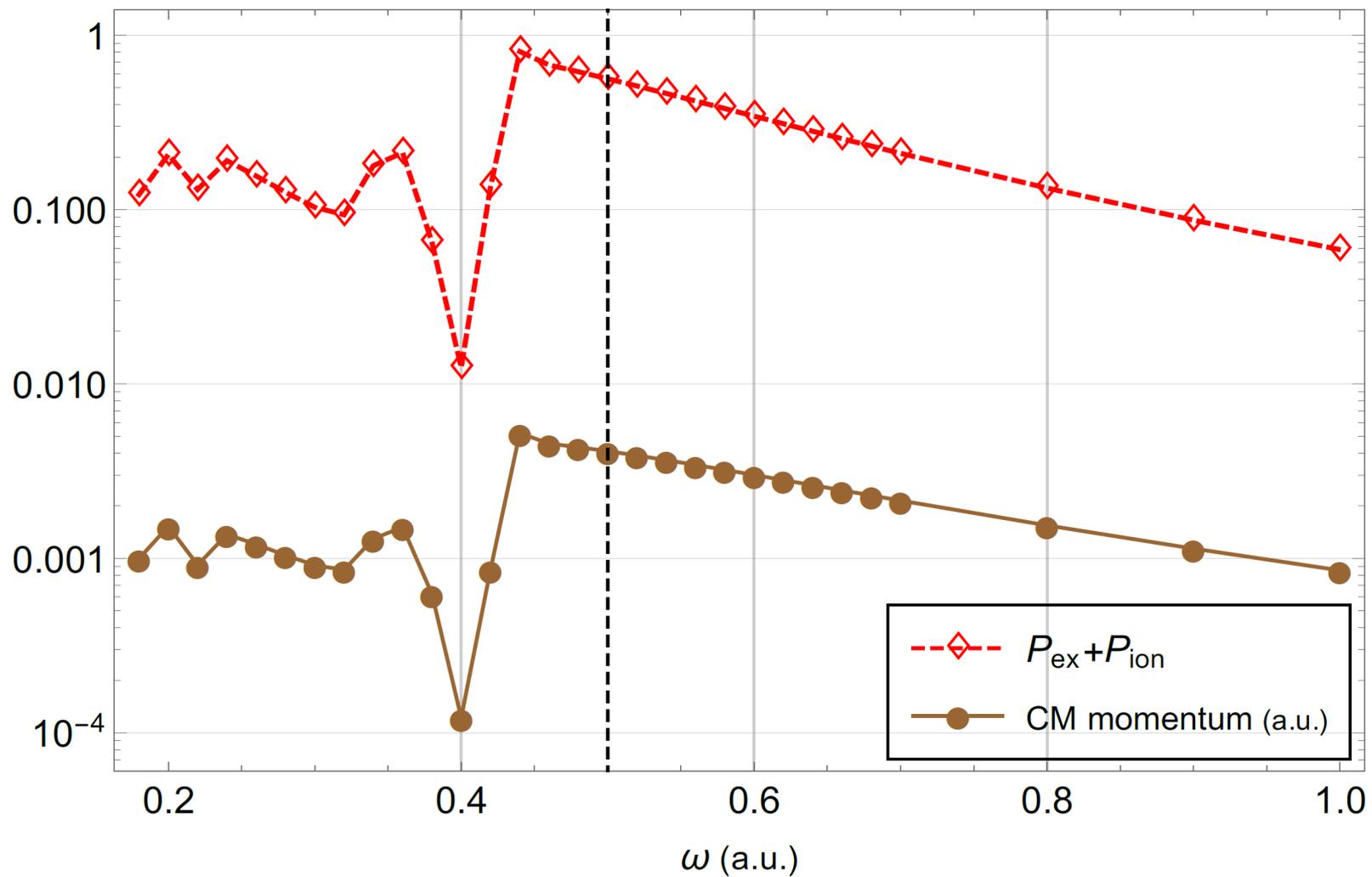
$$P_n(\omega, t) \xrightarrow{t \rightarrow T_{out}} P_n(\omega)$$



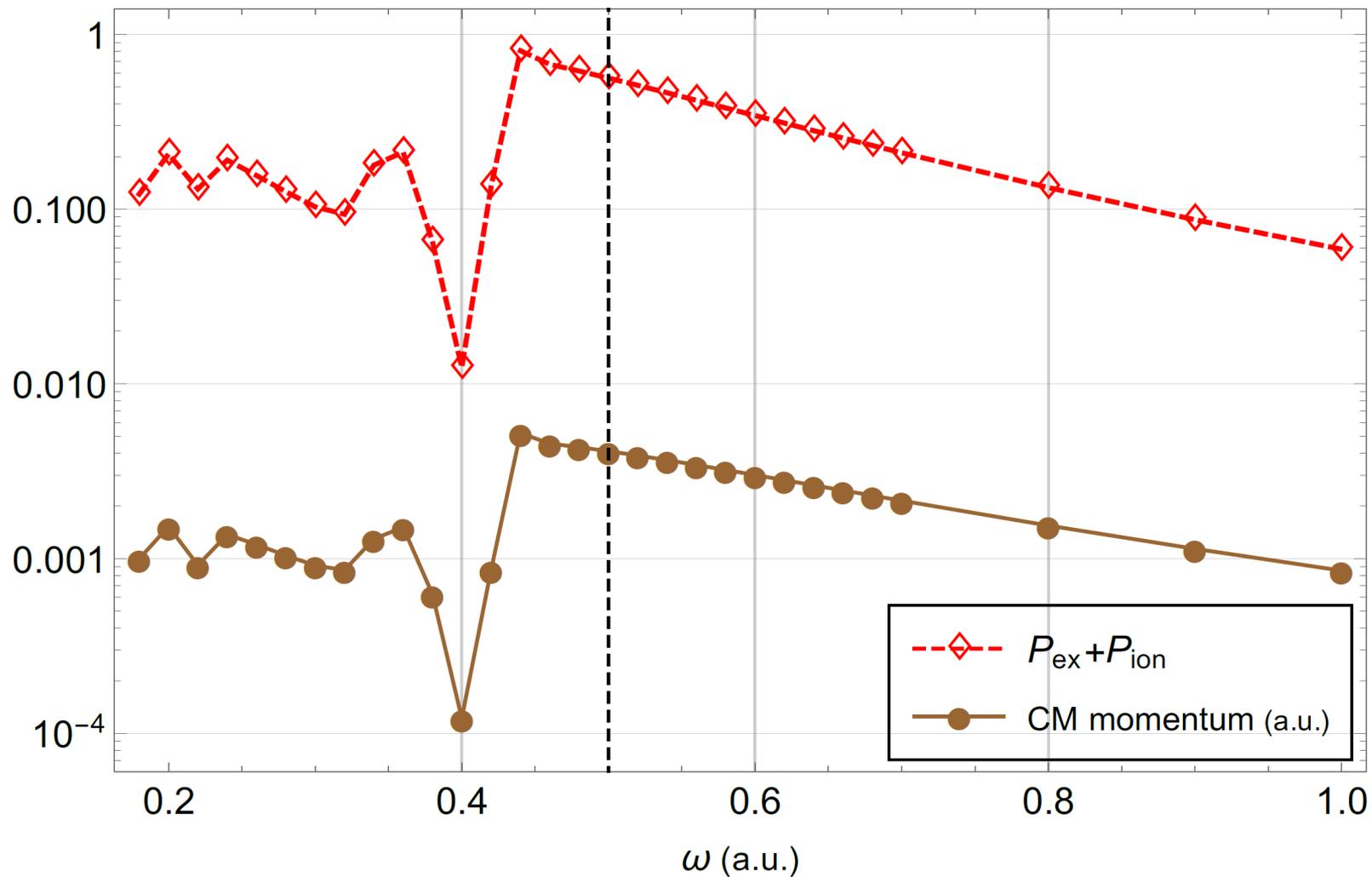
non-resonant mechanism







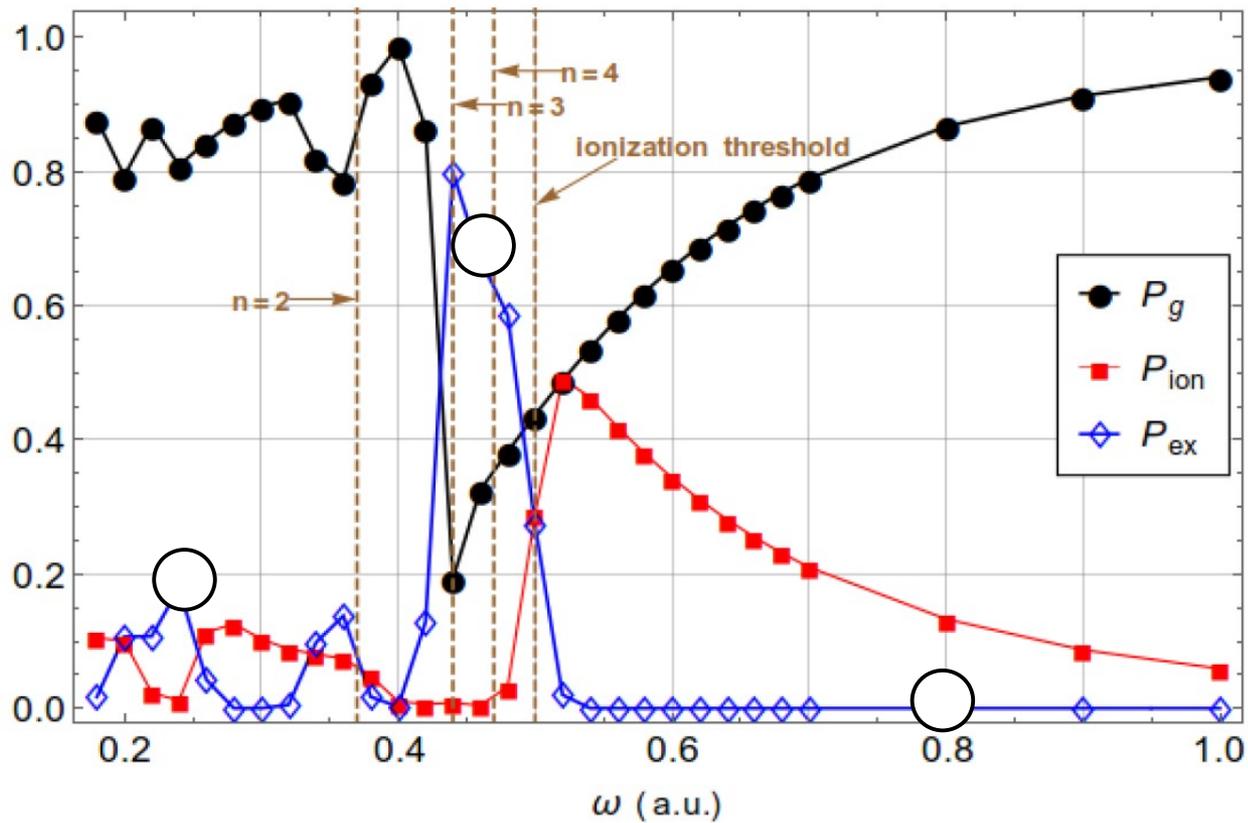
strong correlation between $P_{ex} + P_{ion}$ and V_y (CM momentum = MV_y)



strong correlation between $P_{ex} + P_{ion}$ and V_y (CM momentum = MV_y)

mechanism of CM acceleration:

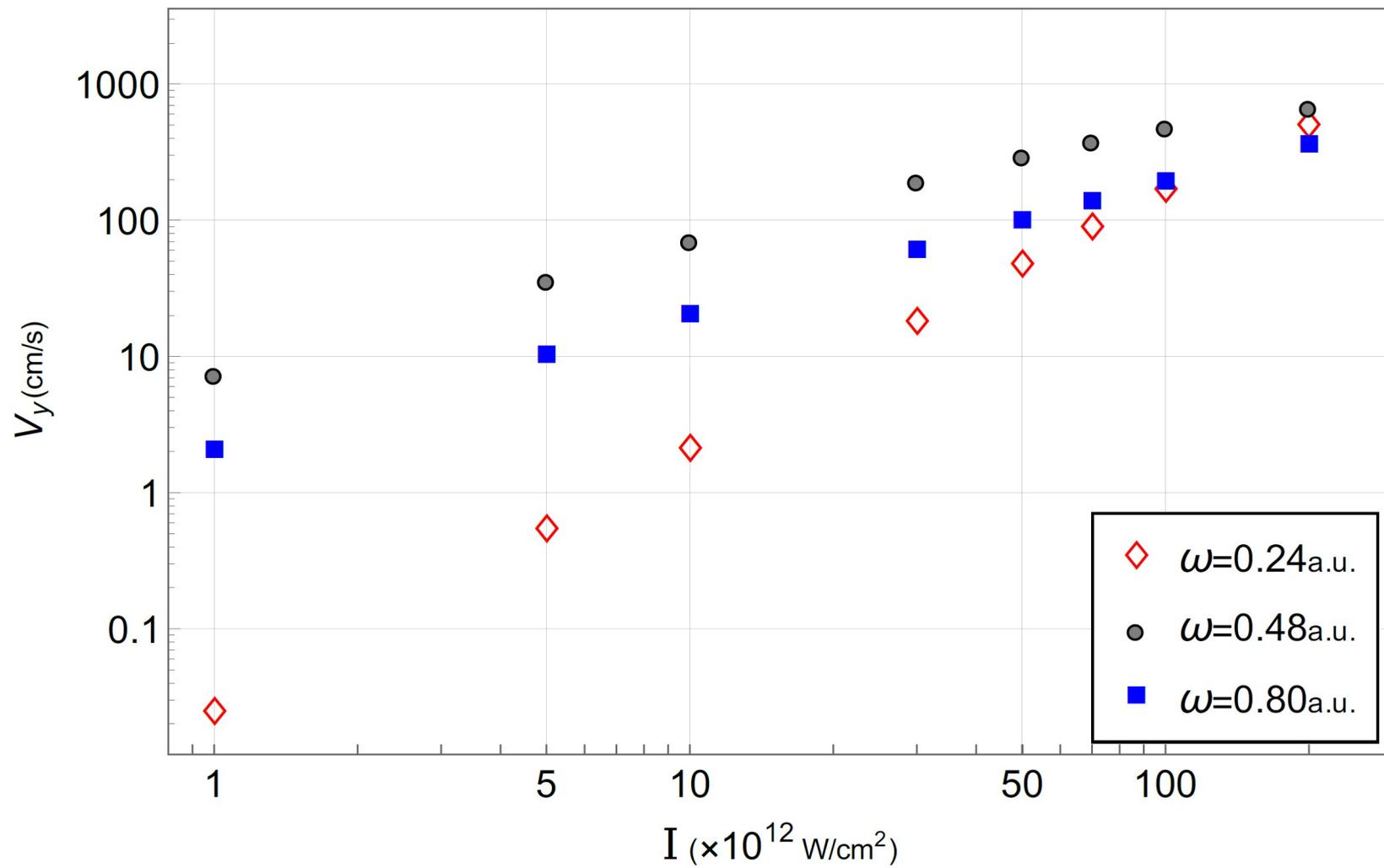
generation of nonzero dipole between proton and electron cloud
 transferred either to excited states of atom or to its continuum

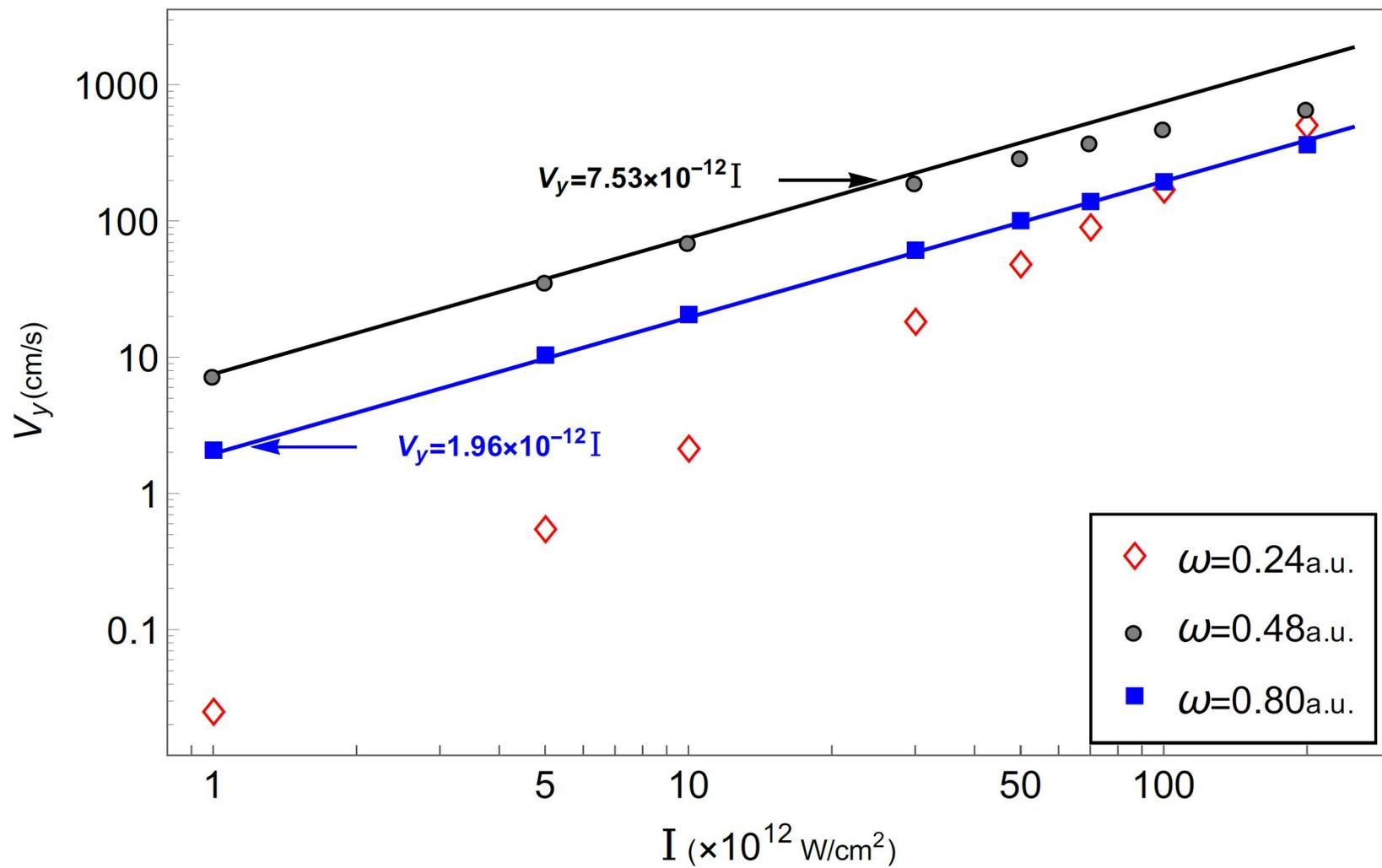


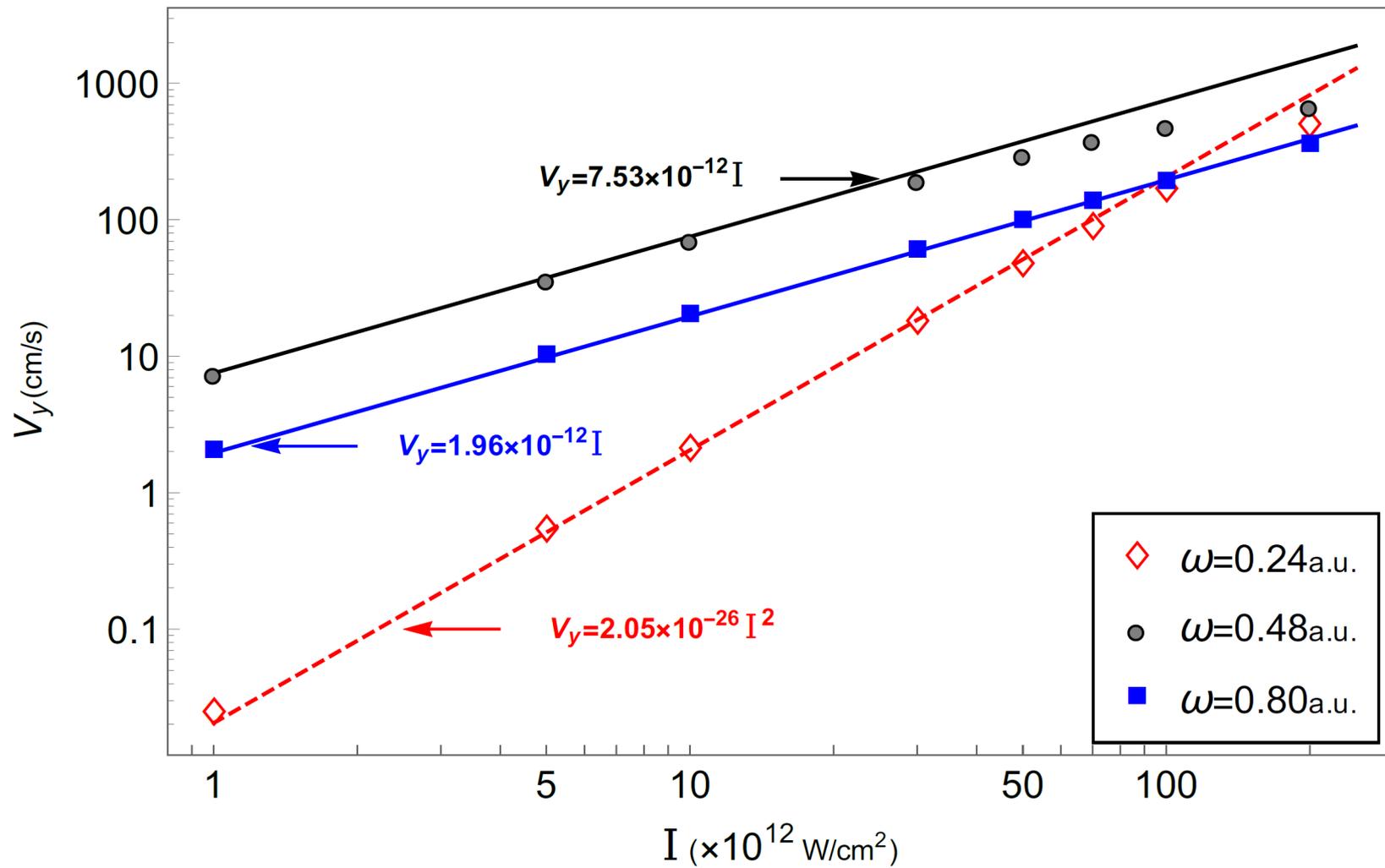
$\omega = 0.48\text{a.u.}$ one-photon resonant transition $n = 1 \rightarrow n' = 4$

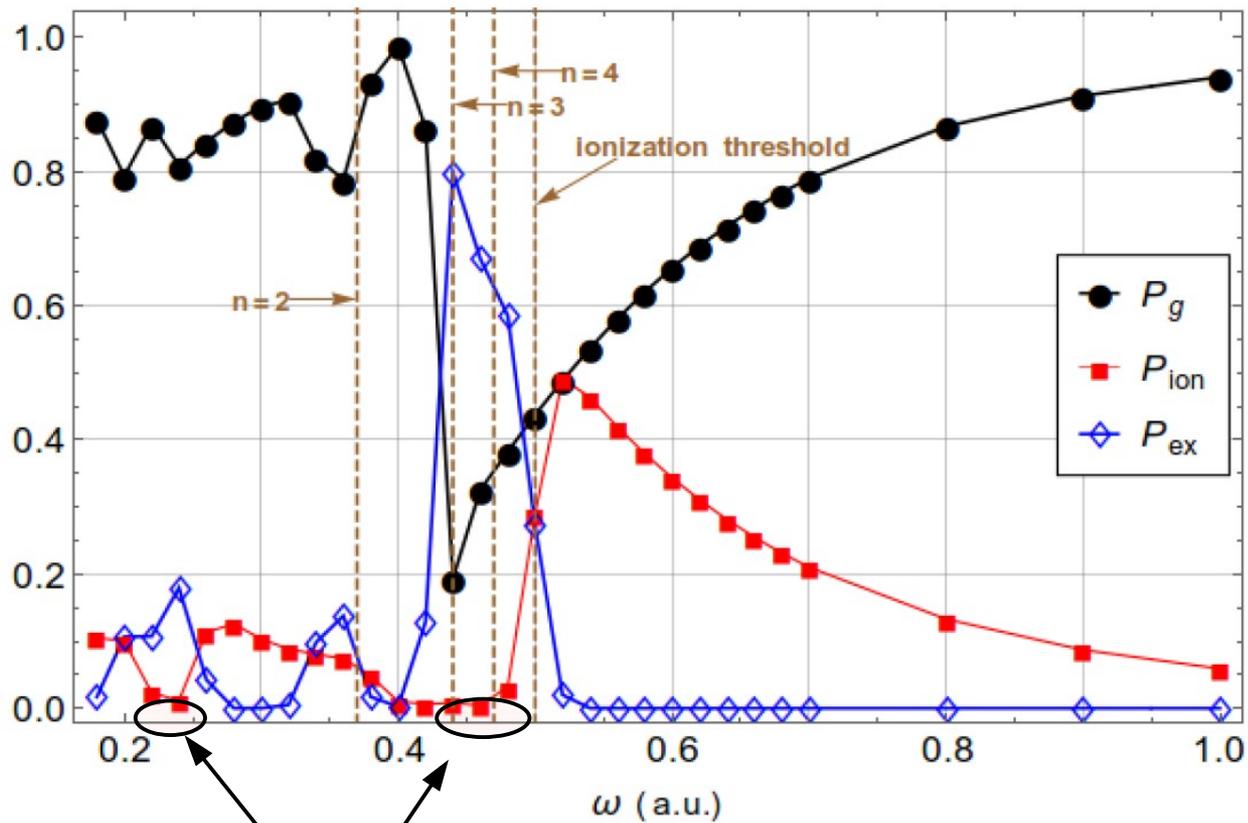
$\omega = 0.24\text{a.u.}$ two-photon resonant transition $n = 1 \rightarrow n' = 4$

$\omega = 0.8\text{a.u.}$ non-resonant mechanism









области перспективные для ускорения атомов, где подавлена ионизация

Закручивание атомов ЭМ импульсами

QUANTUM PHYSICS

Vortex beams of atoms and molecules

Alon Luski^{1†}, Yair Segev^{1†,‡}, Rea David¹, Ora Bitton¹, Hila Nadler¹, A. Ronny Barnea², Alexey Gortach³, Ori Cheshnovsky², Ido Kaminer³, Edvardas Narevicius^{1*}

SCIENCE • 1 Sep 2021 • Vol 373, Issue 6559 • pp. 1105-1109

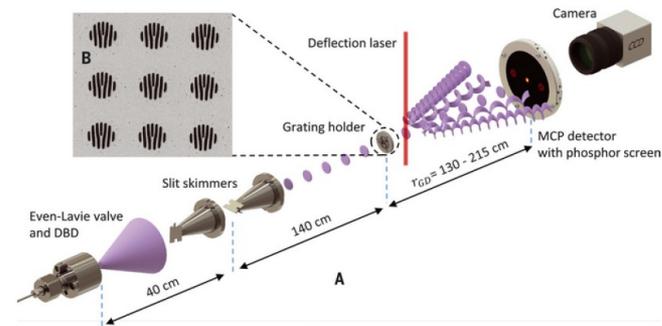


fig. 2. Experimental setup for the production and detection of atomic and molecular vortex beams.

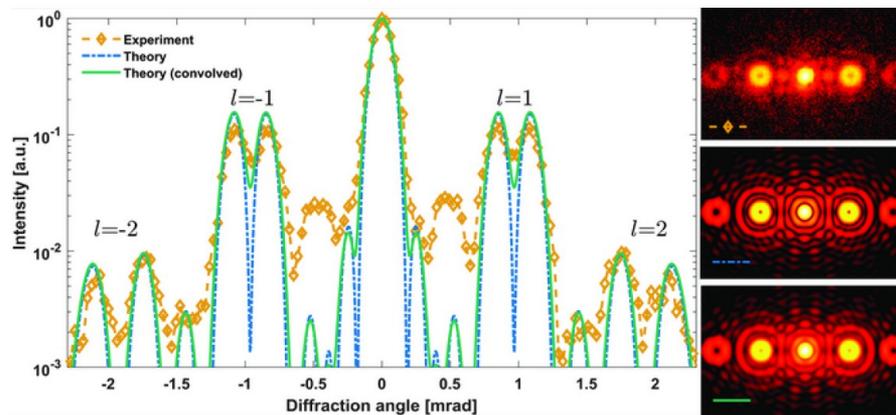
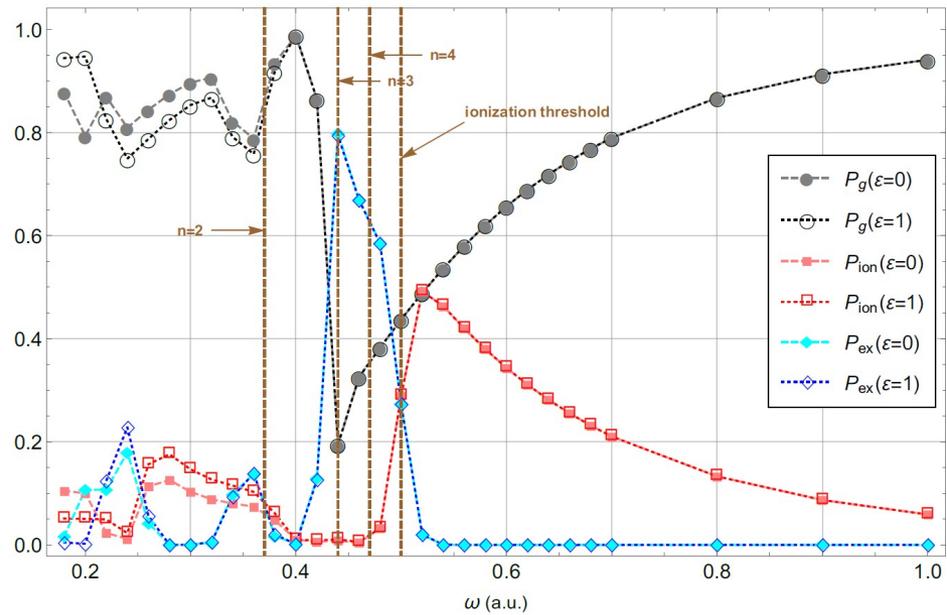
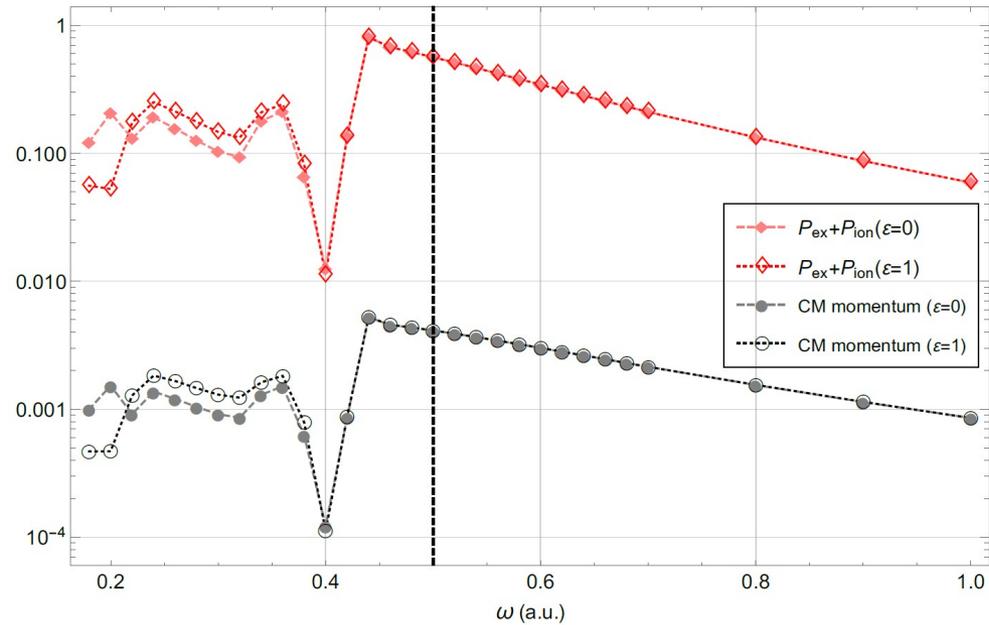


Fig. 4. Comparison of intensity measured in the experiment to theory, with simulated contribution of only the atoms.

Закручивание атомов ЭМ импульсами



Закручивание атомов ЭМ импульсами

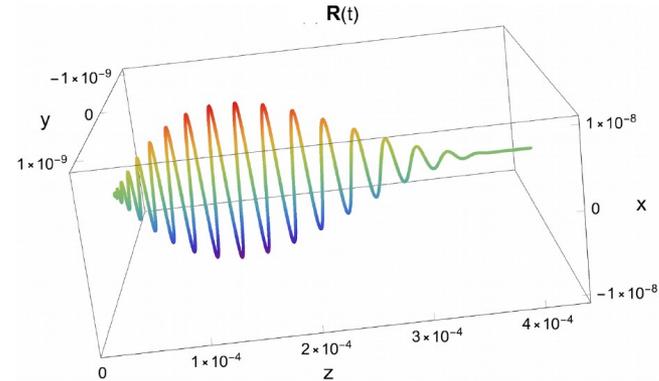
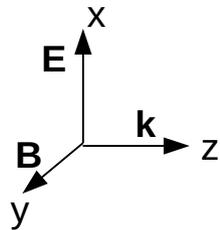


Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

Линейная поляризация ($\epsilon=0$)

$$A = \frac{E_0}{\omega\sqrt{2}} \sin^2\left(\frac{\pi t}{NT}\right) [-\hat{x} \sin(\omega t - kz)]$$

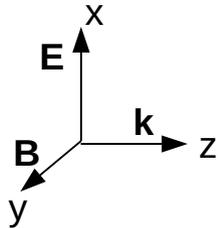


Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.у.

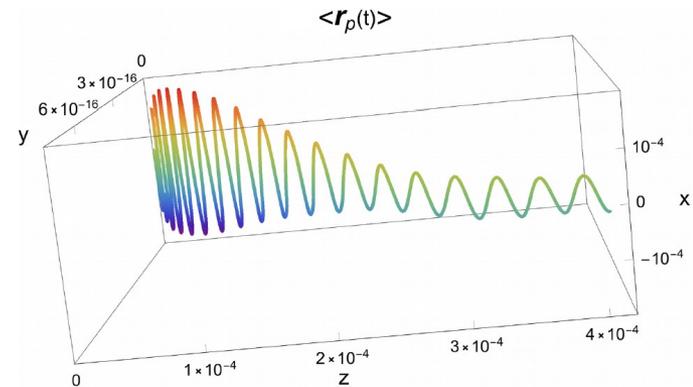
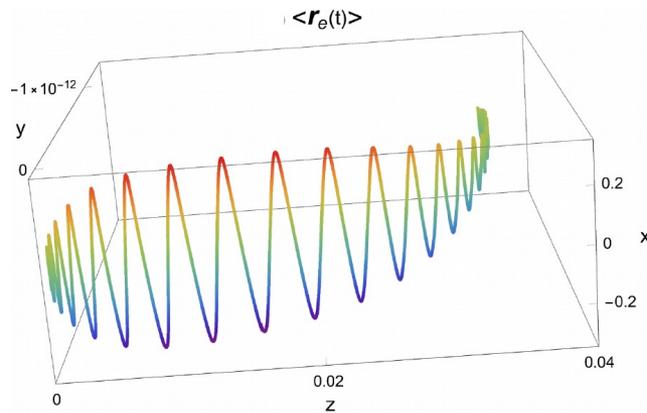
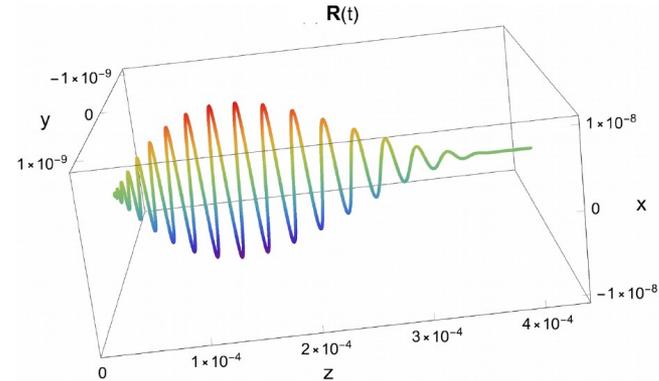
Линейная поляризация ($\epsilon=0$)

$$A = \frac{E_0}{\omega\sqrt{2}} \sin^2\left(\frac{\pi t}{NT}\right) [-\hat{x} \sin(\omega t - kz)]$$



$$\langle x_e(t) \rangle = X_{cm}(t) + \frac{m_p}{M} \langle x(t) \rangle$$

$$\langle x_p(t) \rangle = X_{cm}(t) - \frac{m_e}{M} \langle x(t) \rangle$$

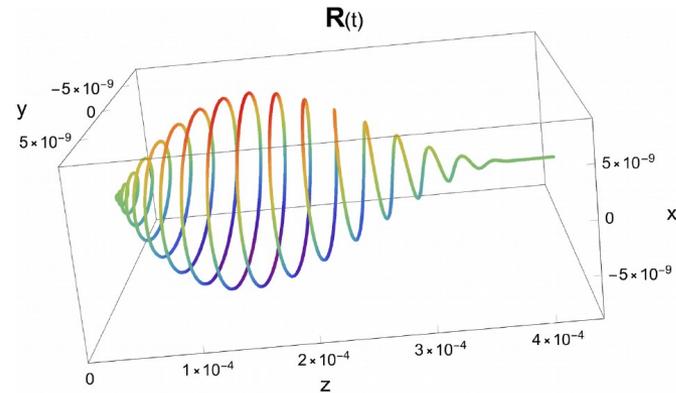
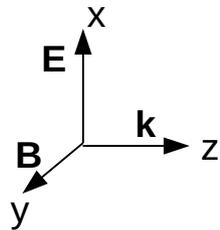


Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

циркулярная поляризация ($\epsilon=1$)

$$A = \frac{E_0}{\omega\sqrt{2}} \sin^2\left(\frac{\pi t}{NT}\right) [-\hat{x} \sin(\omega t - kz) + \hat{y} \cos(\omega t - kz)]$$

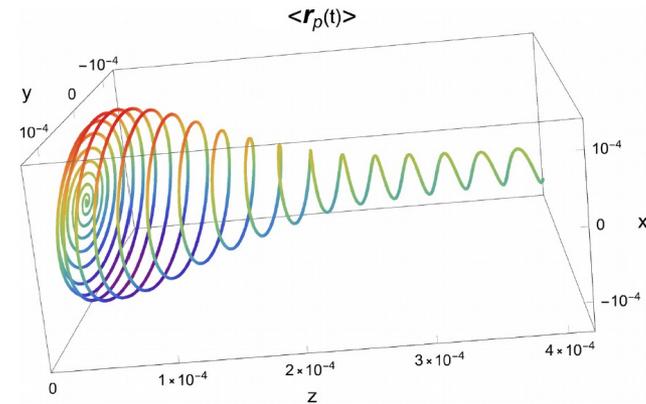
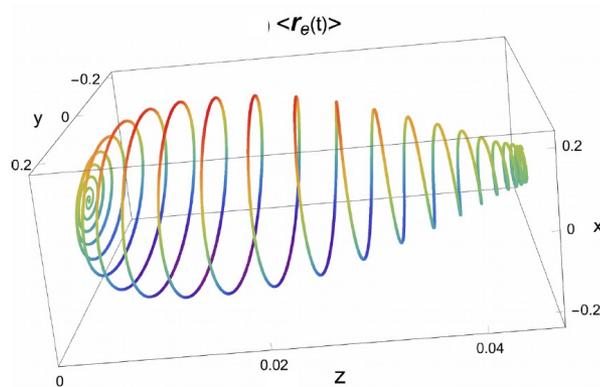
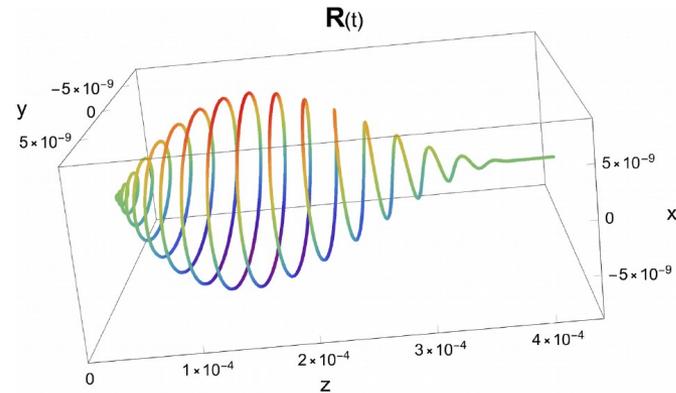
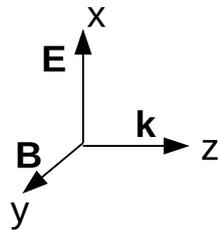


Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

циркулярная поляризация ($\epsilon=1$)

$$A = \frac{E_0}{\omega\sqrt{2}} \sin^2\left(\frac{\pi t}{NT}\right) [-\hat{x} \sin(\omega t - kz) + \hat{y} \cos(\omega t - kz)]$$

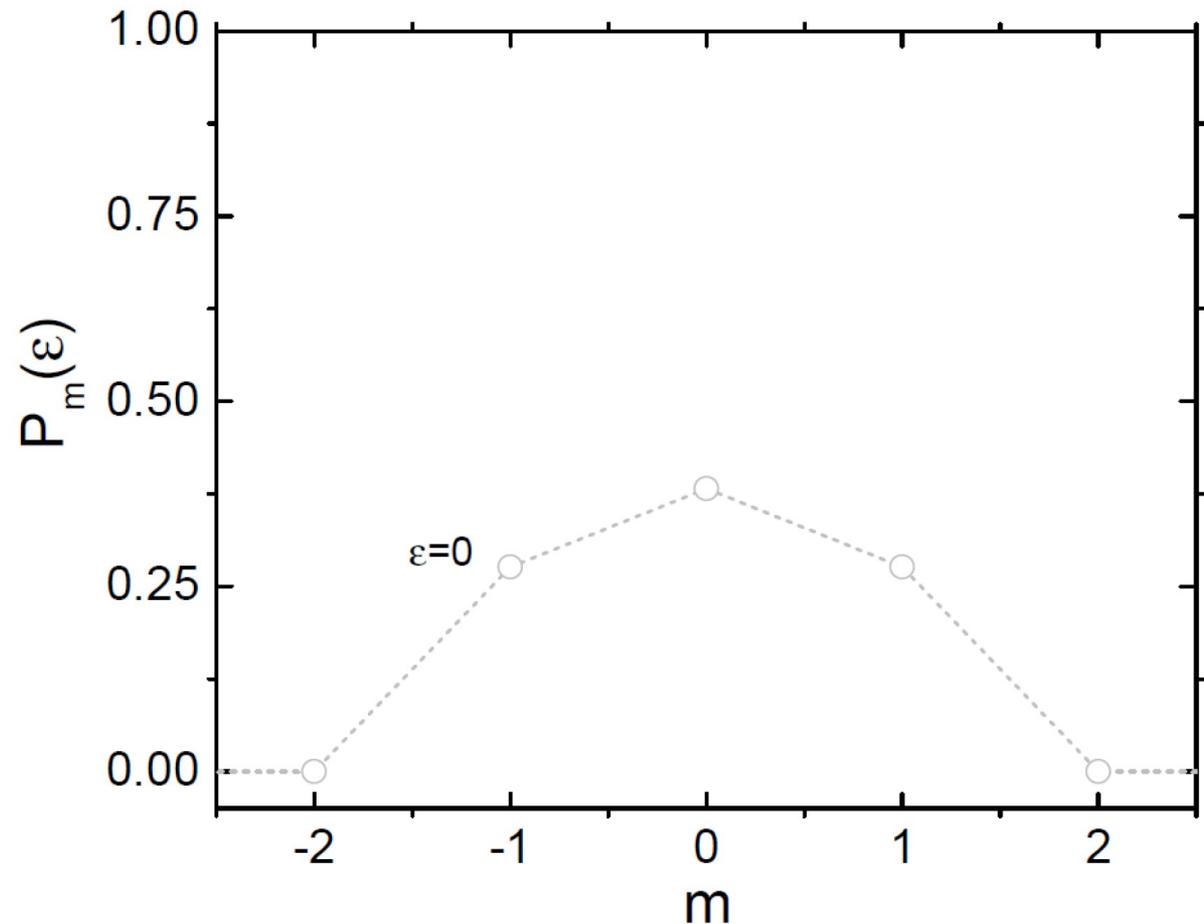
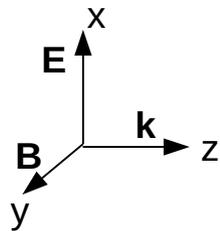


Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.у.

эллиптическая поляризация ($\epsilon=0-1$)

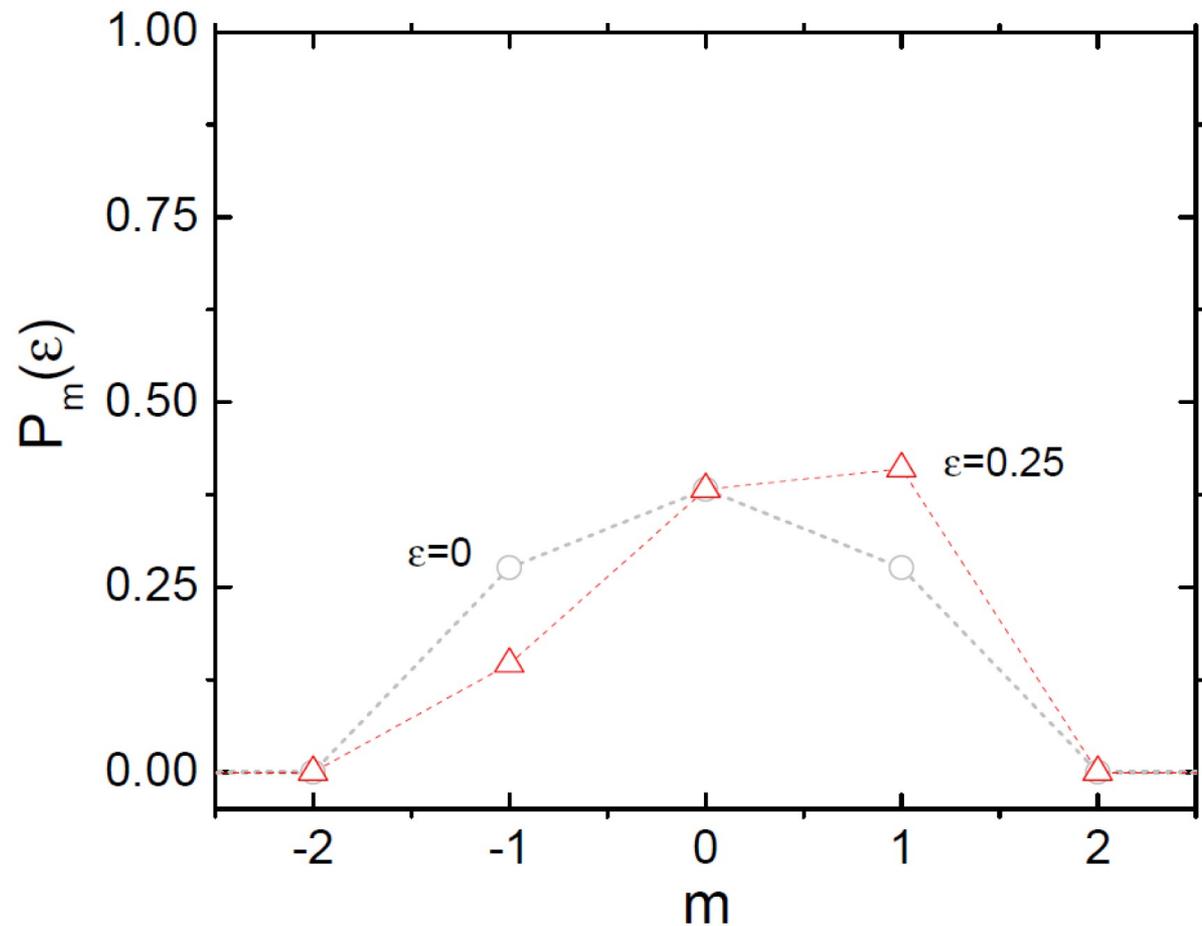
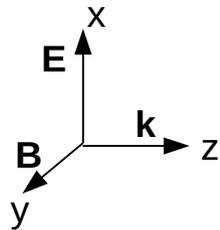
$$P_m = \sum_{n=l+1}^{n_{max}} \sum_{l=|m|}^{n_{max}-1} |\langle \psi | \phi_{nlm} \rangle|^2$$



Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

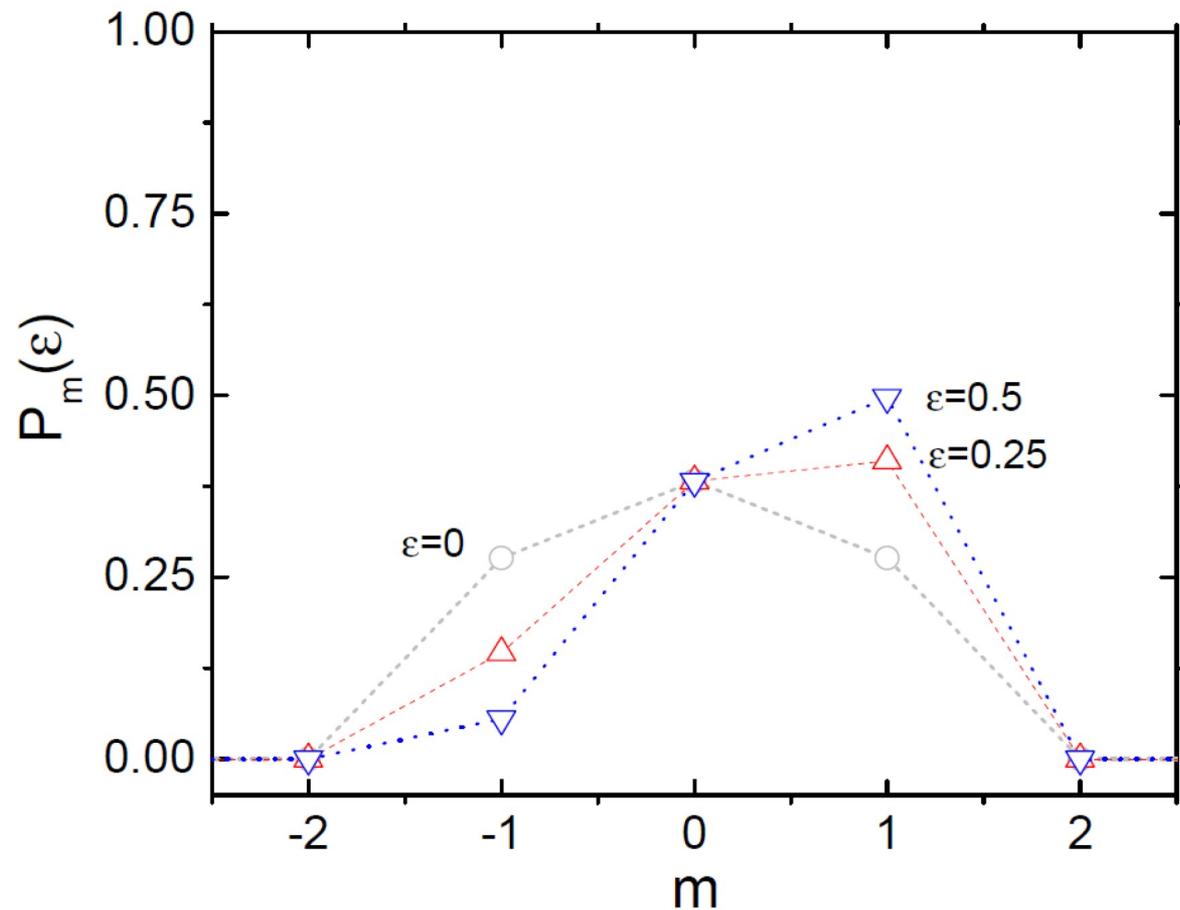
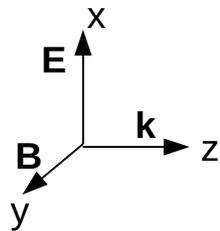
эллиптическая поляризация ($\epsilon=0-1$)



Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

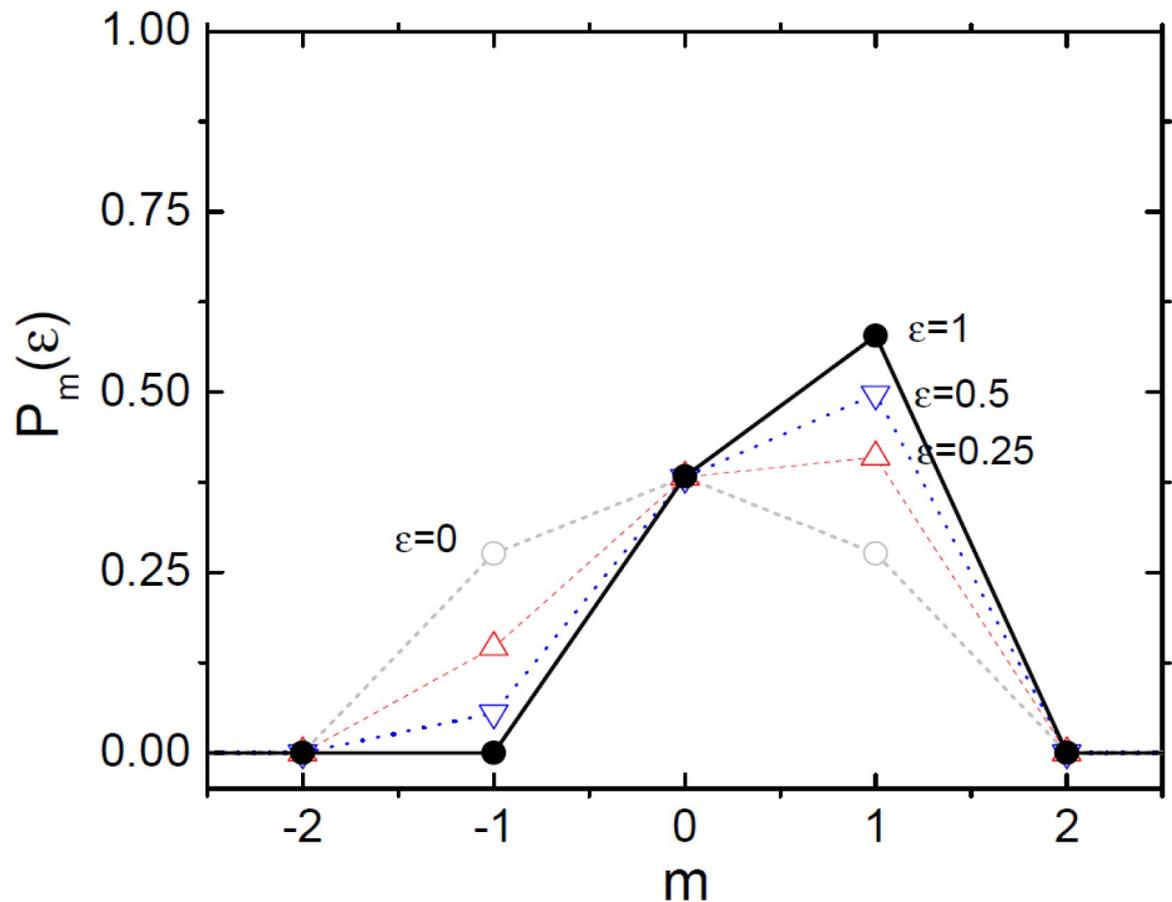
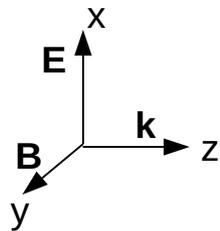
эллиптическая поляризация ($\epsilon=0-1$)



Закручивание атомов ЭМ импульсами

10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

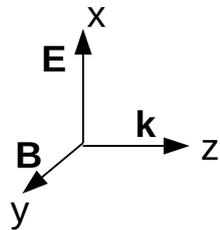
циркулярная поляризация ($\epsilon=1$)



Закручивание атомов ЭМ импульсами

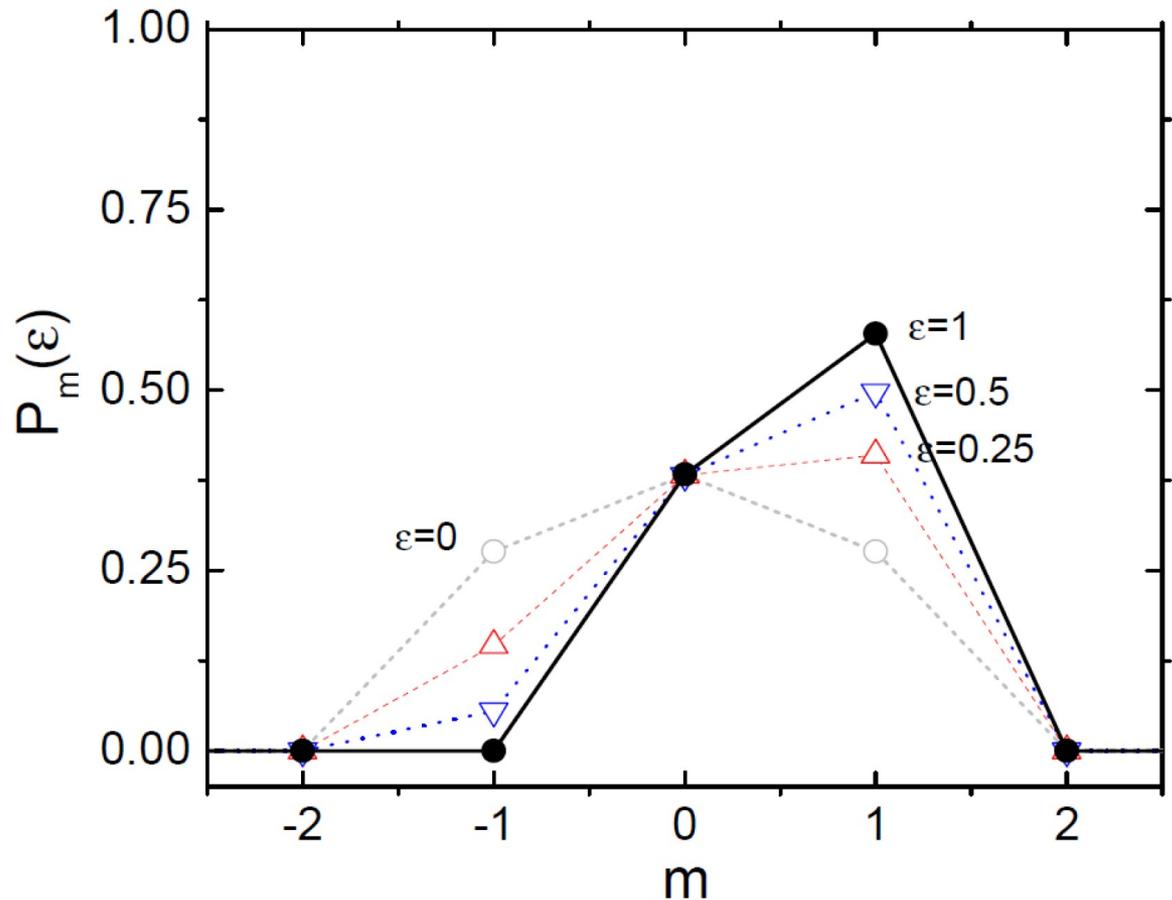
10^{14} Вт/см², ~ 10 фс, $h\nu \sim 13$ эВ ~ 0.48 а.е.

циркулярная поляризация ($\epsilon=1$)



$$\langle \hat{l}_z \rangle = \sum_m P_m(\epsilon) m$$

при взаимодействии с циркулярно поляризованным ЭМ импульсом атом ускоряется и «закручивается» - приобретает орбитальный момент с проекцией $m=+1$ на направление его движения (спиральность +1)



Заключение & перспективы

- исследовано ускорение атома за счет недипольных поправок $k\mathbf{r}$ в ЭМ волне и магнитной компоненты \mathbf{V}/c в ней
- обнаружена сильная корреляция между V (MV) и $P_{ex} + P_{ion}$
- установлены два резонансных механизма ускорения:
через однофотонное и двухфотонное возбуждение атома

однофотонный $V \sim I$

двухфотонный $V \sim I^2$

Заключение & перспективы

- исследовано ускорение атома за счет недипольных поправок kr в ЭМ волне и магнитной компоненты V/c в ней
- обнаружена сильная корреляция между V (MV) и $P_{ex} + P_{ion}$
- установлены два резонансных механизма ускорения:
через однофотонное и двухфотонное возбуждение атома

однофотонный $V \sim I$

двухфотонный $V \sim I^2$

трехфотонный $V \sim I^3$?

Заключение & перспективы

- исследовано ускорение атома за счет недипольных поправок kr в ЭМ волне и магнитной компоненты V/c в ней
- обнаружена сильная корреляция между V (MV) и $P_{ex} + P_{ion}$
- установлены два резонансных механизма ускорения: через однофотонное и двухфотонное возбуждение атома
- потенциальные приложения:

ускоренные атомы — литография микро-чипов для микро-электроники, диагностика плазмы в ТОКАМАК, ...

«закрученные» атомы — модификация фундаментальных взаимодействий, новый «инструмент» для исследования атомных столкновений, ...

Заключение & перспективы

- исследовано ускорение атома за счет недипольных поправок kr в ЭМ волне и магнитной компоненты V/c в ней
- обнаружена сильная корреляция между V (MV) и $P_{ex} + P_{ion}$
- установлены два резонансных механизма ускорения: через однофотонное и двухфотонное возбуждение атома
- **недипольные эффекты (учет движения ядер) во взаимодействии атомов с ИКИ** $V_2(r, R, t) = \frac{\omega}{c} E_0(\dots)$: + генерация высоких гармоник, влияние на стабилизацию атомов, ...
создан задел для исследования недипольных эффектов: различные атомы, учет пространственной неоднородности ЭМ импульса, различные поляризации, закрученные атомы, ...

Заключение & перспективы

гибридный квантово-квазиклассический метод + DVR

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

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

V S Melezhik, S Shadmehri, Photonics 10(12), 1290 (2023)

V S Melezhik, S Shadmehri, arXiv: 2408.08613