

УДК 535.36

В. А. Астапенко, Н. Н. Мороз, Е. С. Храмов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Комптоновское рассеяние аттосекундных рентгеновских импульсов на многоэлектронных атомах

Теоретически исследуется комптоновское рассеяние аттосекундных рентгеновских импульсов на атомах благородных газов и щелочных металлов. Рассмотрение проводится в терминах спектрально-угловой вероятности рассеяния за все время действия импульса. Проанализирована зависимость вероятности рассеяния от несущей частоты и длительности импульса, частоты рассеянной волны и угла рассеяния. Показано, что при определенных значениях параметров задачи вероятность процесса является нелинейной функцией длительности импульса.

Ключевые слова: комптоновское рассеяние, аттосекундные импульсы, атомы аргона и ксенона, атом натрия.

V. A. Astapenko, N. N. Moroz, E. S. Khramov

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Compton scattering of attosecond X-ray pulses on multielectron atoms

The work is devoted to the theoretical investigation of Compton scattering of attosecond X-ray pulses on atoms of noble gases and alkali metals. The analysis is made in terms of the spectral-angular probability of scattering during the entire time of the action of the pulse. The dependence of the scattering probability on the carrier frequency, pulse duration, and the scattering angle is analyzed. It is shown that the probability of the process is a nonlinear function of the pulse duration for certain values of the parameters of the problem.

Key words: ultrashort Compton scattering, attosecond pulses, atoms of argon and xenon, sodium atom.

1. Введение

Методы генерации коротких и ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) получили активное развитие в последние годы [1]. Уже сейчас с помощью лазеров на свободных электронах (XFEL) возможно получать УКИ с длительностями порядка 1 фс, при этом непрерывно ведется работа по их сокращению. Так, в работе [2] предложен метод генерации изолированных одноцикловых рентгеновских импульсов с длительностью 380 ас на средней длине волны 8.6 нм. В статье [3] разработан подход, позволяющий генерировать субцикловые XFEL импульсы с длительностью 10.7 ас. Таким образом, указанные экспериментальные достижения делают актуальным теоретическое исследование взаимодействия аттосекундных рентгеновских импульсов с различными мишенями. В частности, значительный фундаментальный и практический интерес представляет анализ рассеяния УКИ на атомах и ионах.

Томсоновское рассеяние УКИ различной формы на свободном электроне анализировалось в работе [4] в нерелятивистском пределе. Было, в частности, показано, что полная

© Астапенко В. А., Мороз Н. Н., Храмов Е. С., 2018

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2018

вероятность рассеяния УКИ для всех несущих частот является монотонно возрастающей функцией длительности импульса.

Резонансное рассеяние фемтосекундных УКИ на атомах в плазме рассчитывалось в статье [5], а упругое рассеяние аттосекундных рентгеновских импульсов на внутренних оболочках атомов исследовалось в работе [6]. В этих работах, в частности, было показано, что полная вероятность упругого рассеяния УКИ на атомах и ионах (за все время действия импульса) является, вообще говоря, нелинейной функцией длительности импульса даже в пределе слабого поля. Данное обстоятельство носит общий характер для всех фотопроцессов в поле УКИ [7, 8].

Переизлучение УКИ на атомах водорода и гелия рассматривалось в статье [9] в рамках приближения мгновенного возмущения, которое предполагает, что длительность импульса много меньше всех характерных атомных времен. В этом приближении связь электрона с ядром учитывается только атомным форм-фактором, что, вообще говоря, недостаточно для корректного описания зависимости вероятности фотопроцесса от всех параметров задачи в широком диапазоне их значений, в частности от длительности импульса.

В настоящей работе исследуется комптоновское рассеяние УКИ на атомах аргона, ксенона и натрия в терминах дифференциальной по углу и частоте вероятности фотопроцесса в зависимости от несущей частоты и длительности импульса, частоты рассеянной волны и угла рассеяния.

2. Метод расчета

В статье [10] было показано, что в случае ультракоротких импульсов понятие вероятности фотопроцесса в единицу времени, которое традиционно применяется для описания электромагнитных явлений, имеет свои границы применимости. В связи с этим предлагается использовать полную вероятность процесса за все время действия УКИ (дифференциальную по углу и частоте), задающуюся следующим выражением [11]:

$$\frac{d^2W}{d\Omega'd\omega'} = \frac{c}{4\pi^2} \int_0^\infty \frac{d\sigma(\omega, \omega', \theta)}{d\Omega'd\omega'} \frac{|E(\omega, \omega_c, \tau)|^2}{\omega} d\omega, \quad (1)$$

где c – скорость света, $E(\omega, \omega_c, \tau)$ – фурье-образ напряженности электрического поля в импульсе, ω – текущая частота, ω_c – несущая частота импульса, τ – длительность импульса, ω' – частота рассеянного излучения, θ – угол рассеяния, $d\Omega'$ – элемент телесного угла рассеяния излучения. Здесь и далее используем атомные единицы $e = \hbar = m_e = 1$.

Спектрально-угловое сечение комптоновского рассеяния, входящее в правую часть формулы (1), можно представить в виде [12]:

$$\frac{d^2\sigma(\omega, \omega', \theta)}{d\Omega'd\omega'} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega'} \right)_{Th} \left(\frac{\omega}{\omega'} \right)^2 \frac{1}{q(\omega, \omega', \theta)} J(Q), \quad (2)$$

где $q(\omega, \omega', \theta)$ – модуль изменения волнового вектора, $J(Q)$ – комптоновский профиль атома,

$$Q(\omega, \omega', q) = \frac{\omega - \omega' - q^2/2}{q}.$$

В настоящей работе для $J(Q)$ используются данные, полученные в [13].

Дифференциальное по углу сечение томсоновского рассеяния монохроматического излучения на свободном электроны в нерелятивистском приближении равно

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega'} \right)_{Th} = \frac{1}{c^4} \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \left(\frac{\omega'}{\omega} \right)^2. \quad (3)$$

В качестве УКИ будем использовать так называемый скорректированный гауссовский импульс [14], квадрат модуля фурье-образ которого имеет вид

$$|E(\omega, \omega_c, \tau)|^2 \cong E_0^2 \tau^2 \frac{\pi}{2} \left(\frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega_c^2 \tau^2} \right)^2 [\exp(-(\omega - \omega_c)^2 \tau^2) + \exp(-(\omega + \omega_c)^2 \tau^2)], \quad (4)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электромагнитного поля в импульсе.

3. Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры дифференциального по частоте и углу сечения комптоновского рассеяния УКИ на атомах аргона, ксенона и натрия, вычисленные по формуле (2) при текущей частоте падающей волны $\omega = 10$ кэВ (рис. 1а) и $\omega = 20$ кэВ (рис. 1б) и угле рассеяния $\theta = \pi$. Как видно из графиков, в случае атома натрия вклад валентного электрона характеризуется более острым пиком, нежели вклад остальных электронов на внутренних оболочках, поэтому мы наблюдаем своеобразный пьедестал в исследуемой зависимости.

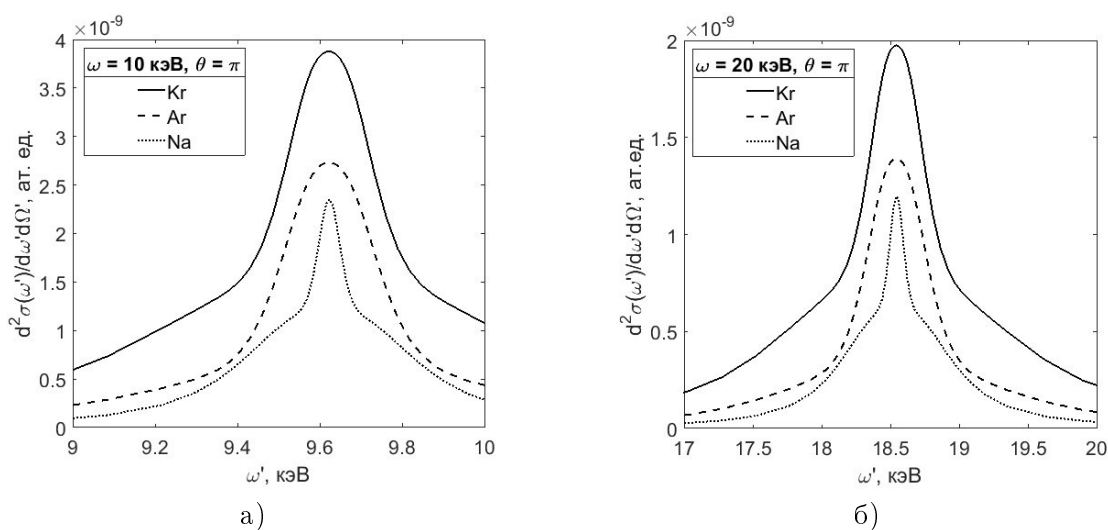


Рис. 1. Спектрально-угловое сечение комптоновского рассеяния на атомах аргона, ксенона и натрия, вычисленное по формуле (2) при текущей частоте падающей волны $\omega = 10$ кэВ (а) $\omega = 20$ кэВ (б): сплошная линия – на атоме криптона, штриховая линия – на атоме аргона, пунктирная линия – на атоме натрия

Вероятность комптоновского рассеяния УКИ рассчитана для амплитуды напряженности электрического поля в импульсе $E_0 = 10^2$ ат. ед. На рис. 2 представлен спектр дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия импульса, нормированный на длительность импульса, при несущей частоте $\omega_c = 10$ кэВ (рис. 1а) и $\omega_c = 20$ кэВ (рис. 1б), угле рассеяния $\theta = \pi$ и различных длительностях $\tau = 1, 3, 10$ ас. Как видно из графиков, зависимость имеет один максимум, амплитуда которого увеличивается с ростом длительности, при этом сам он становится уже. В случае $\omega_c = 10$ кэВ зависимость имеет несимметричный характер, который проявляется сильнее с увеличением длительности импульса. С ростом значения несущей частоты несимметричность постепенно исчезает. На рис. 2а при $\omega_c = 20$ кэВ и достаточно больших длительностях УКИ мы видим некую ступеньку, которая является следствием выполнения закона сохранения энергии.

На рис. 3, 4 представлены зависимости дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ, угла рассеяния $\theta = \pi$ и различных значений частоты рассеянной волны $\omega' > \omega_c$ (рис. 3) и $\omega' < \omega_c$ (рис. 4). При значениях частоты рассеянной волны больше несущей исследуемые зависимости имеют один максимум.

Амплитуда максимума с увеличением частоты падает, а его положение смещается в область меньших длительностей. При частоте рассеянной волны меньше несущей частоты импульса зависимости имеют максимум и минимум в области $\tau = 0.5\text{--}2$ ас. Амплитуда максимума падает при уменьшении частоты рассеянной волны, при этом его положение смещается в сторону более коротких длительностей. При длительности УКИ $\tau = 2\text{--}3$ ас зависимость приобретает линейный вид, который хорошо описывается в рамках классического подхода. Аналогичные расчеты для других значений несущих частот показали, что при увеличении значения несущей частоты воздействующего импульса указанные нелинейности становятся менее выраженными.

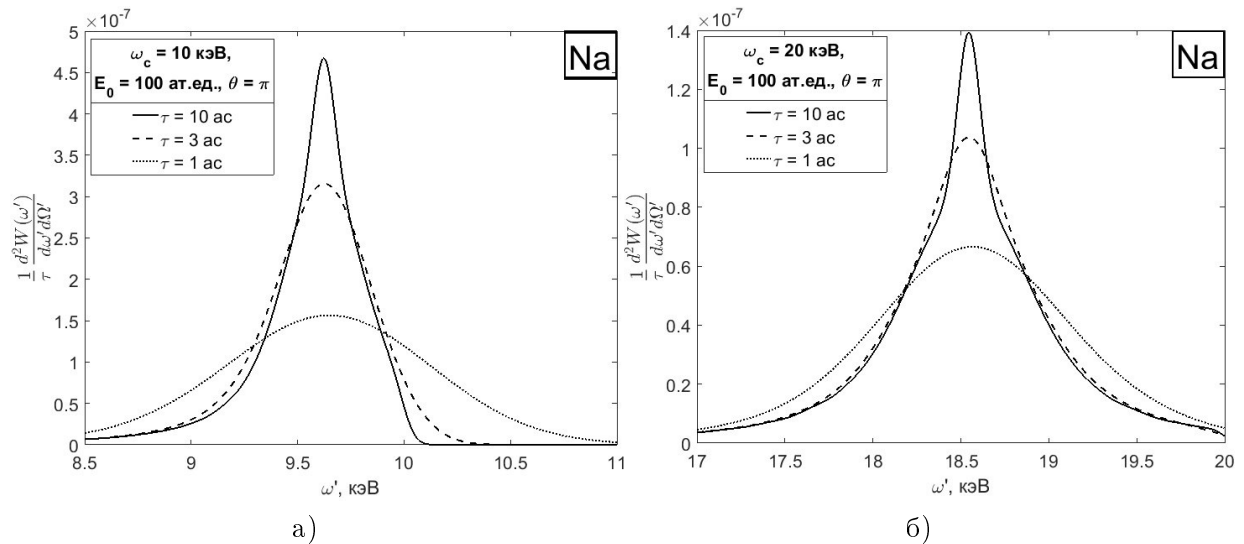


Рис. 2. Спектр дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния за все время действия импульса при несущей частоте $\omega_c = 10$ кэВ (а) $\omega_c = 20$ кэВ (б) и различных длительностях: сплошная линия – $\tau = 1$ ас, штриховая линия – $\tau = 3$ ас, пунктирная линия – $\tau = 10$ ас. Величина вероятности нормирована на длительность импульса

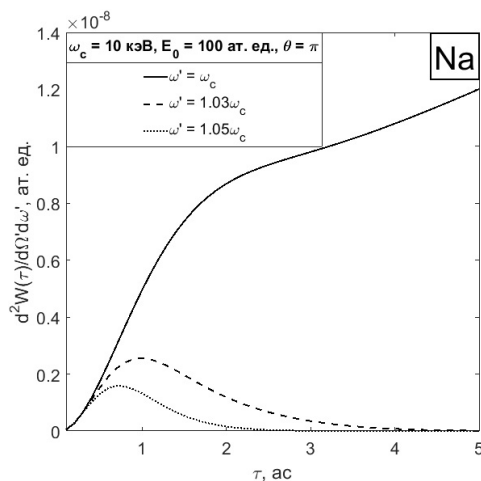


Рис. 3. Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ и различных значений частоты рассеянной волны: сплошная линия – $\omega' = 10$ кэВ, штриховая линия – $\omega' = 10.3$ кэВ, пунктирная линия – $\omega' = 10.5$ кэВ

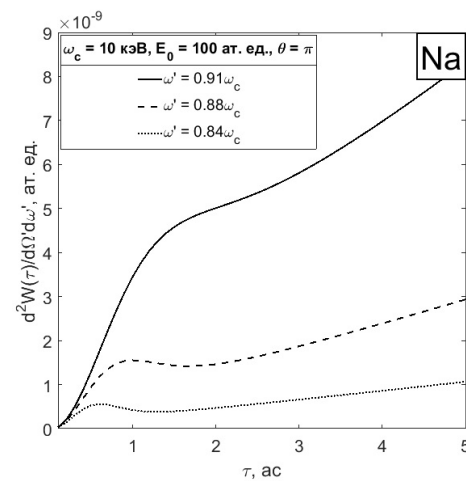


Рис. 4. Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ и различных значений частоты рассеянной волны: сплошная линия – $\omega' = 9.1$ кэВ, штриховая линия – $\omega' = 8.8$ кэВ, пунктирная линия – $\omega' = 8.4$ кэВ

На рис. 5, 6 представлены зависимости дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ и различных углов рассеяния $\theta = \pi, \frac{2\pi}{3}, \frac{\pi}{4}$ при частоте рассеянной волны $\omega' > \omega_c$ (рис. 5) и $\omega' < \omega_c$ (рис. 6). Как видно из графиков, в случае, когда $\omega' > \omega_c$, амплитуда максимума зависимости достигает своей наибольшей величины при рассеянии на небольших углах относительно направления волнового вектора падающей волны. Наименьшее значение достигается при рассеянии под углом $\theta = \frac{\pi}{2}$. В случае, когда $\omega' < \omega_c$, исследуемая величина приобретает свои наибольшие значения при рассеянии назад.

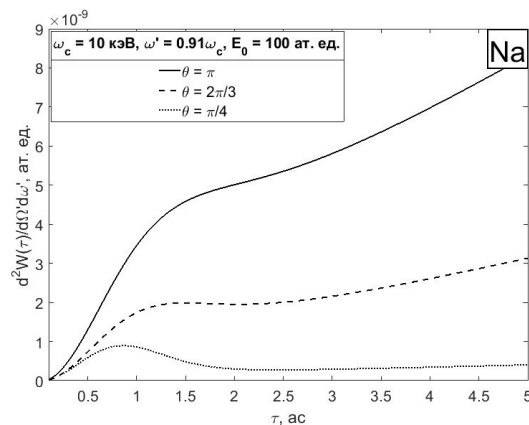
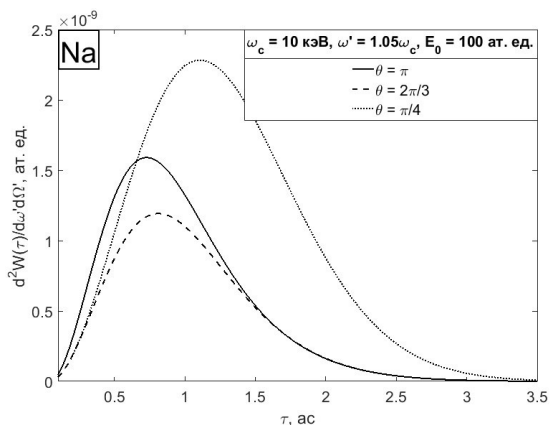


Рис. 5. Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ, частоте рассеянной волны $\omega' = 10.5$ кэВ и различных углах рассеяния: сплошная линия – $\theta = \pi$, штриховая линия – $\theta = \frac{2\pi}{3}$, пунктирная линия – $\theta = \frac{\pi}{4}$

Рис. 6. Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме натрия за все время действия УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ, частоте рассеянной волны $\omega' = 9.1$ кэВ и различных углах рассеяния: сплошная линия – $\theta = \pi$, штриховая линия – $\theta = \frac{2\pi}{3}$, пунктирная линия – $\theta = \frac{\pi}{4}$

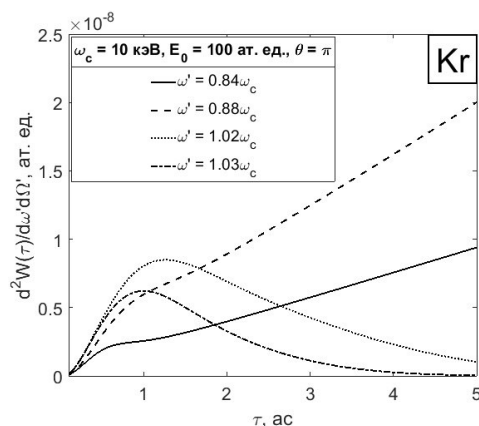
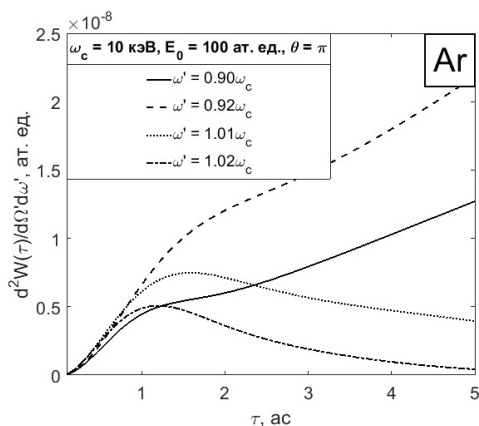


Рис. 7. Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме аргона за все время действия импульса УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ и различных значений частоты рассеянной волны: сплошная линия – $\omega' = 9$ кэВ, штриховая линия – $\omega' = 9.2$ кэВ, пунктирная линия – $\omega' = 10.1$ кэВ, штрихпунктирная линия – $\omega' = 10.2$ кэВ

Рис. 8. Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния на атоме криптона за все время действия импульса УКИ от длительности импульса для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ и различных значений частоты рассеянной волны: сплошная линия – $\omega' = 8.4$ кэВ, штриховая линия – $\omega' = 8.8$ кэВ, пунктирная линия – $\omega' = 10.2$ кэВ, штрихпунктирная линия – $\omega' = 10.3$ кэВ

На рис. 7, 8 приведены зависимости дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния за все время действия импульса УКИ от длительности импульса на атомах аргона и криптона для несущей частоты $\omega_c = 10$ кэВ, угла рассеяния $\theta = \pi$ и различных значений частоты рассеянной волны $\omega' > \omega_c$ и $\omega' < \omega_c$. Как видно из графиков, для атомов благородных газов наблюдаются зависимости, аналогичные зависимостям в случае натрия. При значениях частоты рассеянной волны больше несущей наблюдается один максимум, в то время как при частоте рассеянной волны меньше несущей мы имеем нелинейность с максимумом и минимумом в области $\tau = 0.5$ –2 ас. Амплитуда максимумов падает при увеличении отстройки частоты рассеянной волны от несущей, при этом положение максимумов смещается в область более коротких длительностей.

4. Заключение

В работе теоретически исследовано комптоновское рассеяние аттосекундных рентгеновских импульсов на атомах благородных газов (аргоне и криптоне) и атоме натрия в зависимости от несущей частоты и длительности импульса, частоты рассеянной волны и угла рассеяния. Рассмотрение проводилось в терминах спектрально-угловой вероятности рассеяния за все время действия импульса. Для всех рассматриваемых мишеней получены зависимости с аналогичными характеристиками.

Показано, что спектр дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния за все время действия импульса представляет собой зависимость с одним максимумом, амплитуда которого увеличивается с ростом длительности, при этом сам он становится уже. Зависимость имеет несимметричный характер, который становится менее выраженным с уменьшением длительности и увеличением несущей частоты импульса.

Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния за все время действия УКИ от длительности импульса в области $\omega' > \omega_c$ (частота рассеянной волны больше несущей частоты импульса) представляет собой структуру с одним максимумом, в то время как в области $\omega' < \omega_c$ (частота рассеянной волны меньше несущей частоты импульса) наблюдается нелинейность с максимумом и минимумом при $\tau = 1$ –2 ас, а при длительности УКИ $\tau = 2$ –3 ас зависимость приобретает линейный вид, который хорошо описывается в рамках классического подхода. Амплитуда максимумов падает с ростом отстройки величины рассеянной волны от несущей, при этом положение максимумов смещается в область более коротких длительностей. При увеличении значения несущей частоты воздействующего импульса указанные нелинейности становятся менее выраженными.

Зависимость дифференциальной по углу и частоте вероятности комптоновского рассеяния за все время действия УКИ от угла рассеяния неодинакова для рассматриваемых областей $\omega' > \omega_c$ и $\omega' < \omega_c$. В первом случае амплитуда максимума зависимости достигает своей наибольшей величины при рассеянии на небольших углах относительно направления волнового вектора падающей волны. Наименьшее значение достигается при рассеянии под углом $\theta = \frac{\pi}{2}$. Во втором случае исследуемая величина приобретает свои наибольшие значения при рассеянии назад.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и образования РФ (задание № 3.9890.2017/8.9).

Литература

1. Krausz F., Ivanov M. Attosecond physics // *Reviews of Modern Physics*. 2009. V. 81. P. 163.
2. Tanaka T. Proposal to Generate an Isolated Monocycle X-Ray Pulse by Counteracting the Slippage Effect in Free-Electron Lasers // *Physical Review Letters*. 2015. V. 114. P. 044801.

3. *Kida Y., Kinjo R., Tanaka T.* Synthesizing high-order harmonics to generate a sub-cycle pulse in free-electron lasers // *Physics Letters A*. 2016. V. 109. P. 151107.
4. *Astapenko V.A., Sakhno S.V.* Scattering of ultrashort electromagnetic pulses by a free electron in the nonrelativistic limit // *International Review of Atomic and Molecular Physics*. 2014. V. 5. P. 83.
5. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S., Moroz N.N.* Nonlinear resonance scattering of femtosecond X-ray pulses on atoms in plasmas // *Physics Letters A*. 2017. V. 381. P. 3576.
6. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* XUV and x-ray elastic scattering of attosecond electromagnetic pulses on atoms // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2017. V. 50. P. 235601.
7. *Astapenko V.A.* Interaction of ultrafast electromagnetic pulses with matter *Springer Briefs in Physics* // Heidelberg, New York, Dordrecht, London. 2013. P. 94.
8. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* Effects of ultrashort laser-pulse durations on Fano resonances in atomic spectra // *Physical Review A*. 2014. V. 90. P. 043421.
9. *Matveev V.I.* Emission and electron transitions in an atom interacting with an ultrashort electromagnetic pulse // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2003. V. 97. P. 915.
10. *Astapenko V.A.* Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field // *Physics Letters A*. 2010. V. 374. P. 1585–1590.
11. *Astapenko V.A.* Scattering of an Ultrashort Electromagnetic Radiation Pulse by an Atom in a Broad Spectral Range // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2011. V. 112. P. 193.
12. *Astapenko V.A.* Radiation interaction with atoms and nanoparticles // *Dolgoprudniy: Intellect*. 2010. P. 492.
13. *Biggs F., Mendelson L.B., Mann J.B.* Hartree-Fock compton profiles for the elements // *Atomic data and nuclear data tables*. 1975. V. 16. P. 201.
14. *Lin Q., Zheng J., Becker W.* Subcycle pulsed focused vector beams // *Physical Review Letters*. 2006. V. 97. P. 253902.

References

1. *Krausz F., Ivanov M.* Attosecond physics. *Reviews of Modern Physics*. 2009. V. 81. P. 163.
2. *Tanaka T.* Proposal to Generate an Isolated Monocycle X-Ray Pulse by Counteracting the Slippage Effect in Free-Electron Lasers. *Physical Review Letters*. 2015. V. 114. P. 044801.
3. *Kida Y., Kinjo R., Tanaka T.* Synthesizing high-order harmonics to generate a sub-cycle pulse in free-electron lasers. *Physics Letters A*. 2016. V. 109. P. 151107.
4. *Astapenko V.A., Sakhno S.V.* Scattering of ultrashort electromagnetic pulses by a free electron in the nonrelativistic limit. *International Review of Atomic and Molecular Physics*. 2014. V. 5. P. 83.
5. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S., Moroz N.N.* Nonlinear resonance scattering of femtosecond X-ray pulses on atoms in plasmas. *Physics Letters A*. 2017. V. 381. P. 3576.
6. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* XUV and x-ray elastic scattering of attosecond electromagnetic pulses on atoms. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2017. V. 50. P. 235601.
7. *Astapenko V.A.* Interaction of ultrafast electromagnetic pulses with matter *Springer Briefs in Physics*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London. 2013. P. 94.

8. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* Effects of ultrashort laser-pulse durations on Fano resonances in atomic spectra. *Physical Review A*. 2014. V. 90. P. 043421.
9. *Matveev V.I.* Emission and electron transitions in an atom interacting with an ultrashort electromagnetic pulse. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2003. V. 97. P. 915.
10. *Astapenko V.A.* Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field. *Physics Letters A*. 2010. V. 374. P. 1585–1590.
11. *Astapenko V.A.* Scattering of an Ultrashort Electromagnetic Radiation Pulse by an Atom in a Broad Spectral Range. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2011. V. 112. P. 193.
12. *Astapenko V.A.* Radiation interaction with atoms and nanoparticles. *Dolgoprudniy: Intellect*. 2010. P. 492.
13. *Biggs F., Mendelson L.B., Mann J.B.* Hartree-Fock compton profiles for the elements. *Atomic data and nuclear data tables*. 1975. V. 16. P. 201.
14. *Lin Q., Zheng J., Becker W.* Subcycle pulsed focused vector beams. *Physical Review Letters*. 2006. V. 97. P. 253902.

Поступила в редакцию 21.05.2018