

ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКА КОМПТОНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

INVESTIGATION OF ACCELERATION AND IONIZATION OF NEUTRAL ATOMS USING COMPTON RADIATION SOURCE

V. S. Melezjik

V. S. Melezjik

Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна, Московская обл.

BLTP "JINR", Dubna, Moscow region, Russia

В докладе представлены результаты исследования в квантово-классическом подходе, разработанном автором, недипольного эффекта неразделения переменных центра масс и электрона в атоме, стимулируемого взаимодействием с электромагнитной волной, и его влияния на ускорение и ионизацию атома водорода. Обсуждается возможность использования этого эффекта для ускорения нейтральных атомов с помощью источника комптоновского излучения.

В настоящее время интенсивно изучается экспериментально и теоретически влияние недипольных эффектов $\sim 1/c = \alpha = 1/137$ на различные атомные процессы в сильных лазерных полях (здесь $c = 1/\alpha = 137$ – скорость света в атомной системе единиц (а.е.), α – постоянная тонкой структуры). Однако, недипольный эффект ($\sim \omega/c$) неоднородности электромагнитной волны волны $\mathbf{k}\mathbf{r} = \omega/cz$, приводящий к неразделению переменных центра масс и электронов в атоме, взаимодействующем с лазерным импульсом, практически неисследован [1], как мы полагаем, из-за вычислительной сложности возникающей задачи. Даже в простейшем случае, в задаче об атоме водорода, взаимодействующем с лазерным излучением, учет этого слагаемого, перепутывающего переменные электрона и протона в гамильтониане задачи, приводит к необходимости решения шестимерного нестационарного уравнения Шредингера. Кроме того, в оптическом диапазоне этот эффект менее актуален по сравнению с другими недипольными эффектами за счет малости частоты излучения $\omega \sim 0,06-0,12$ а.е. Однако, для частот источника комптоновского излучения $\omega \geq 137$ а.е., т.е. начиная с энергий фотона $E_\gamma = \hbar\omega = 3,7$ кэВ, порядок этого эффекта становится сравнимым с основным дипольным взаимодействием и даже может его превышать, поскольку в этом случае $\omega/c \geq 1$.

В этой связи, становится актуальной задача об исследовании на источнике комптоновского излучения влияния недипольного эффекта неразделения переменных центра масс и электронов в атоме на различные атомные процессы.

В недавней работе В. С. Мележика [2] исследовалась задача об атоме водорода в сильном лазерном поле с учетом движения ядра (за счет недипольного эффекта неразделения переменных центра масс и электрона) в рамках разработанного автором квантово-классического метода. В частности, выполненный расчет продемонстрировал пропорциональность ускорения атома энергии фотона (см. рис. 1). Было показано, что с ростом энергии фотона от 1,5 эВ до 13,6 эВ атом может ускоряться до величины $\sim 10^{15}$ g при интенсивности 10^{14} Вт/см² и длительности импульса ~ 10 фс, что не противоречит имеющимся экспериментальным данным работы [3], где удалось ускорить атомы гелия и неона до величины $\sim 10^{14}$ g в фемтосекундном лазерном импульсе интенсивности 8×10^{15} Вт/см² с энергией фотонов 1.0-1.5 эВ. Установленная пропорциональность между ускорением атома и энергией фотона $E_\gamma = \hbar\omega$ обусловлена тем, что слагаемое в гамильтониане задачи, «перепутывающее» переменные электрона и центра масс во внешнем электромагнитном поле и приводящее атом как целое к ускорению, содержит общим

множителем параметр малости $\omega/c = \omega\alpha = \omega/137$. Поэтому увеличение энергии фотона (частоты ω) приводит к усилению «перепутывания» переменных электрона и центра масс и к увеличению ускорения атома как целого. При достижении энергией фотона $E_\gamma = \hbar\omega$ величины $137\text{a.u.} = 3,7\text{ кэВ}$ параметр малости $\omega/c = \omega\alpha = \omega/137$ при «перепутывающем» переменные слагаемом в гамильтониане задачи исчезает и оно сравнивается по величине с основным дипольным взаимодействием. Таким образом, фотоны от источника комптоновского излучения представляют уникальную возможность для исследования недипольных эффектов, обусловленных неразделением переменных в атоме, взаимодействующем с электромагнитным излучением. Причем источник комптоновского излучения более перспективен для исследования возможности получения пучков ускоренных нейтральных атомов по сравнению с мощным лазерным излучением. Действительно, лазерное поле кроме ускорения атома вызывает также его ионизацию, вероятность которой, в широком диапазоне исследованных интенсивностей, возрастает с ростом интенсивности. В источнике комптоновского излучения интенсивности существенно ниже, и ионизация подавлена, что дает дополнительный аргумент в его пользу по сравнению с мощным лазерным излучением для ускорения нейтральных атомов.

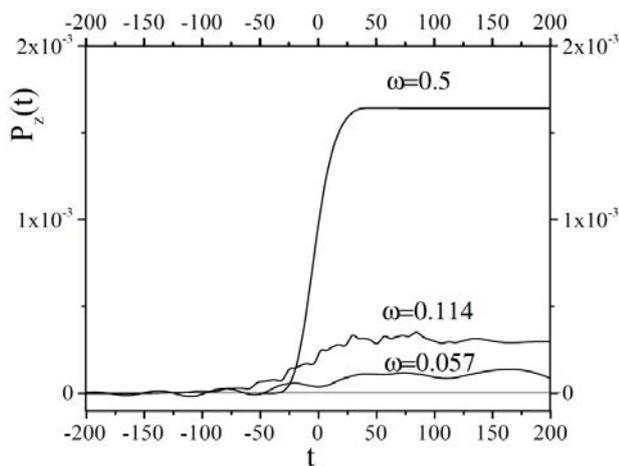


Рис. 1: Рассчитанная по методу, предложенному в работе [2], зависимость импульса $P_z(t)$ ускоряемого атома водорода от времени t и частоты лазера ω (энергии фотона $E_\gamma = \hbar\omega$): 0,057 (1,5эВ), 0,114 (3 эВ), 0,5 (13,6 эВ). Импульс атома $P_z(t)$, частоты лазера ω и время t приведены в атомных единицах

Резюмируя: нам представляется перспективной задача исследования возможности ускорения

нейтральных атомов на источнике комптоновского излучения в широком диапазоне изменения энергий фотонов $\geq 137\text{a.u.} \approx 3,7\text{ кэВ}$, формы и длительности импульсов комптоновского источника, с интенсивностями существенно слабее мощного лазерного излучения для подавления ионизации. Ускоренные атомы могут иметь широкий спектр приложений, в частности, для литографии и диагностики плазмы в термоядерных установках (обзор литературы можно найти в работах [4–6]). В группе В. С. Мележика наработан существенный задел [2,7] для проведения теоретических расчетов в указанной области. За рубежом эта задача пока не исследовалась.

Следует отметить, что перспективным также представляется исследование на источнике комптоновского излучения влияния недипольного эффекта несепарабельности центра масс на ионизацию атома комптоновским излучением и генерацию атомом высоких гармоник, поскольку эти эффекты до настоящего времени не исследовались. В то же время, недипольные эффекты, не приводящие к «перепутыванию» движения электрона и ядра атома, достаточно изучены. В частности, предсказывается их влияние на «стабилизацию» атомов при больших лазерных интенсивностях (вероятность ионизации выходит на плато существенно ниже единицы) [8] и генерацию высоких гармоник (в спектре излучения атома появляются четные гармоники, которые запрещены в дипольном приближении) [9]. Эти недипольные поправки [8,9] составляют величину $\sim 1/c = 1/137$ по сравнению с дипольным взаимодействием. Очевидно, что влияние недипольных поправок, приводящих к неразделению переменных центра масс и ядра, на ионизацию атома и генерацию высоких гармоник необходимо тем более учитывать на источниках комптоновского излучения, где их порядок становится сравнимым с основным дипольным взаимодействием и даже может его превышать (на источнике комптоновского излучения параметр ω/c может существенно превышать единицу). В этой связи, нам представляются перспективными исследования ионизации атомов и генерации высоких гармоник на источниках комптоновского излучения. Заделом для теоретических расчетов в этой области также может служить квантово-классический подход разработанный в работах [2,7].

Список литературы

1. Bray A. W., Eichmann U., Patchkovskii S. Dissecting strong-field excitation dynamics with

atomic-momentum spectroscopy // *Phys. Rev. Lett.* 2020. Vol. 125. P. 233202-1-4.

2. Melezhik V. S. Quantum-quasiclassical analysis of center-of-mass nonseparability in hydrogen atom stimulated by strong laser fields // *J. Phys. A* 2023. Vol. 56. P. 154003-1-15.

3. Eichmann U., Nubbenmeyer T., Rottke H., and Sandner W. Acceleration of neutral atoms in strong short-pulse laser fields // *Nature* 2009. Vol. 461. P. 1261–1264.

4. Cai P., Zha J. J., Xie Y. J., Wei Q., Wang P. X. Rydberg-atom acceleration by tightly focused intense laser pulses // *Phys. Rev. A* 2019. Vol. 99. 053401-1-6.

5. Maher-McWilliams C., Douglas P., Barker P. F. Laser-driven acceleration of neutral particles // *Nature Photonics* 2012. Vol. 6, P. 386–389.

6. Wang P. X., Wei Q., Cai P., Wang J.X., Ho Y. K. Neutral particles pushed or pulled by laser pulses // *Optics Letters* 2016. Vol. 41, N 2. P. 230–233.

7. Shadmehri S. and Melezhik V. S. A hydrogen atom in strong elliptically polarized laser fields within discrete variable representation // *Laser Physics* 2023. Vol. 33. P. 026001-1-14.

8. Forre M. and Simonsen A. Nondipole ionization dynamics in atoms induced by intense xuv laser fields // *Phys. Rev. A* 2014. Vol. 90. P. 053411-1-10.

9. Mishra M., Kalita D. J., Gupta A. K. Breakdown of dipole approximation and its effect on high harmonic generation // *Eur. Phys. J. D* 2012. Vol. 66. P. 169-1-5.