



## تأثیرات مثبت اعمال چیرپ غیرخطی بر میدان لیزر سه رنگی به منظور تولید پالس کوتاه تر آتو ثانیه

شکوفه آتش سخن، سعید باطبی و فروغ حسین زاده

دانشکده فیزیک دانشگاه گیلان، خیابان نامجو، رشت

چکیده - در این مقاله، تاثیر فاز وابسته به زمان غیر خطی، "چیرپ"، بر میدان لیزری سه رنگی به منظور به دست آوردن پالس کوتاه آتو ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در جهت تولید طیف هماهنگ های مرتبه ی بالا برای میدان لیزری سه رنگی به حل معادله ی یک بعدی وابسته به زمان شرودینگر برای اتم هلیوم پرداخته ایم. نتایج شبیه سازی نشان داده است که اعمال چیرپ غیر خطی بر میدان لیزری سه رنگی باعث گسترش ناحیه ی تخت و افزایش فرکانس قطع در طیف هماهنگ های مرتبه ی بالا شده است و در نتیجه موفق به تولید پالس کوتاه 79 آتو ثانیه شده ایم.

کلید واژه- پالس آتو ثانیه، چیرپ، میدان لیزر سه رنگی، هماهنگ های مرتبه ی بالا

### The positive effects of applying nonlinear chirp to a three color laser field in order to generate a shorter attosecond pulse

Shokoofeh Atash Sokhan, Saeed Batebi, and Forouq Hosseinzadeh

Department of Physics, University of Guilan, Rasht

Abstract- In this paper, in order to achieve a short attosecond pulse, the effects of nonlinear time dependent phase, "chirp", on a three color laser field has been studied. So, with the propose of producing high order harmonics for a three color laser field, we have solved the time dependant 1D Schrodinger equation for single Helium atom. Result of simulation has shown that applying nonlinear chirp to a three color laser field has caused the extension of plateau and The cutoff frequency in the harmonic spectra and as a result we have succeed to produce a short 79 attosecond pulse.

Keywords: attosecond, cut off, nonlinear chirp, plateau

گیریم:

$$E(t) = E_1 f_1(t) \cos(\omega_1(t) + \varphi_1) + E_2 f_2(t) \cos(\omega_2(t) + \varphi_2) + E_3 f_3(t) \cos(\omega_3(t) + \varphi_3) \quad (2)$$

که در آن  $E_1, E_2, E_3$  به ترتیب دامنه های میدان اصلی، کنترلی اول و کنترلی دوم می باشند.

$f_i(t)$  پوش گوسی میدان لیزر فرودی با رابطه ی زیر:

$$f_i(t) = 2 \ln 2 \left( \left( \frac{t}{\tau_i} \right)^2 \right) \quad (3)$$

تعریف می شود. که در آن  $i = 1, 2, 3$  و تمام پهنا در نیم بیشینه<sup>۴</sup> و اصطلاحاً مدت تپش میدان لیزر نام دارد.  $\omega_{1,2,3}$  و  $\varphi_{1,2,3}$  نیز فرکانس زاویه ای و فاز مربوط به میدان اصلی و کنترلی اول و دوم است.

با در دست داشتن تابع موج  $\psi(x, t)$  شتاب دو قطبی القایی وابسته به زمان با استفاده از قضیه ی اهرنفتست از رابطه ی زیر قابل محاسبه است [2]:

$$d(t) = \langle \psi(x, t) | -\frac{\partial V(x)}{\partial x} + E(t) | \psi(x, t) \rangle \quad (4)$$

طیف HHG از تبدیل فوریه ی شتاب دو قطبی به دست می آید:

$$P_q(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^T d(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

در نتیجه پالس آتو ثانیه از بر هم نهی چندین مرتبه از هماهنگ ها حاصل می شود:

$$I(t) = \left| \sum_q d_q e^{-iq\omega t} dt \right|^2 \quad (6)$$

$$d_q = \int d(t) e^{-iq\omega t} dt \quad (7)$$

که به دلیل جفت شدگی فازی در هماهنگ های نزدیک بسامد قطع در طیف HHG،  $q$ ها از این ناحیه انتخاب می شوند.

## ۱- مقدمه

برای مطالعه ی فرایندهای فوق سریع در مقیاس های زمانی نانو ثانیه تا فمتو ثانیه، لیزرهای توان بالا و فوق سریع به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند. در مولکول ها دوره ی تناوب حرکت های چرخشی و ارتعاشی به ترتیب از مرتبه ی پیکو و فمتو ثانیه هستند در نتیجه لیزر های فمتو ثانیه ای ابزاری مناسب جهت مطالعه ی دینامیک مولکول ها هستند. مطالعه ی دینامیک های الکترونی نیازمند پالس های فوق کوتاه و حتی از مرتبه ی آتو ثانیه است. دانش آتو ثانیه شامل مطالعه پدیده هایی است که در مقیاس زمانی بسیار کوتاه رخ می دهند. از دانش آتو ثانیه برای مطالعه واکنش های شیمیایی، تغییر در ساختار مولکولی و دینامیک الکترون های مقید استفاده می شود. تا به امروز تولید هماهنگ های مرتبه بالا در محیط های گازی مهم ترین روش برای تولید پالس های آتو ثانیه بوده اند. روند تولید هماهنگ های مرتبه بالا می تواند به وسیله مدل نیمه کلاسیکی سه مرحله ای توصیف شود [1].

در مرحله ی اول الکترون به واسطه ی تونل زنی از قید هسته که پتانسیل آن در اندرکنش با میدان لیزر فرودی تغییر شکل داده است خارج می شود، در مرحله ی دوم الکترون در میدان لیزر نوسان و انرژی جنبشی کسب می کند، نهایتاً در مرحله ی سوم انرژی جنبشی خود را در زمان باز ترکیب با هسته ی مادر با مقدار:

$$E_{cutoff} = I_p + 3.17 U_p \quad (1)$$

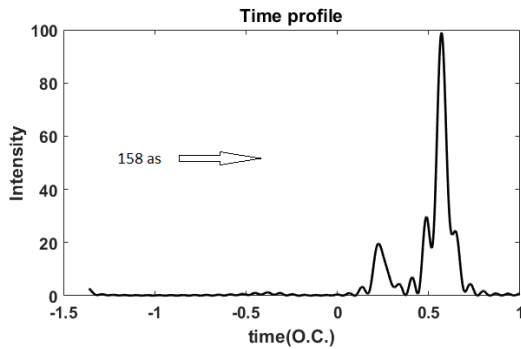
به نهشت می گذارد. در این رابطه  $I_p$  انرژی یونیزاسیون و  $U_p$  پتانسیل پاندرماتیو (متوسط انرژی جنبشی اکتسابی الکترون در میدان الکتریکی) با مقدار  $U_p = I_0 / 4\omega_0^2$  که  $I_0$  و  $\omega_0$  به ترتیب شدت و فرکانس زاویه ای لیزر فرودی است. [3] لازم به ذکر است که تمامی محاسبات در واحد  $(a.u.)^3$  است.

## ۲- حل تئوری

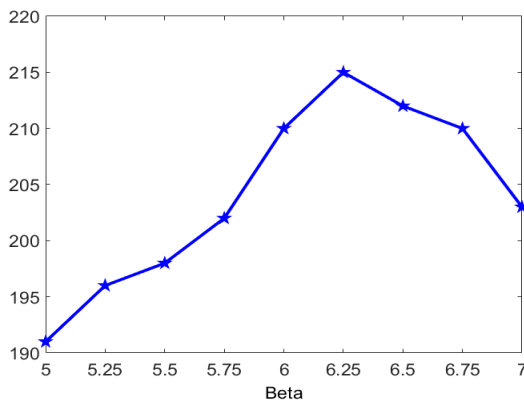
در این مقاله محاسبات بر اساس حل عددی معادله ی شرودینگر وابسته به زمان در یک بعد  $(TDSE)^4$  با در نظر گرفتن تک الکترون شتاب گرفته شده و پتانسیل کولنی هموار شده انجام پذیرفته است.

میدان لیزری فرودی را سه رنگی و به صورت زیر در نظر می

جایگزین فاز ثابت  $\varphi_1 = \pi$  کنیم. چیرپ غیر خطی  $\beta \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right)$  را در میدان اصلی جایگزین  $\varphi_1$  شد.  $\beta$  پارامتر چیرپ و  $\tau$  را  $600a.u.$  برگزیده شدند.

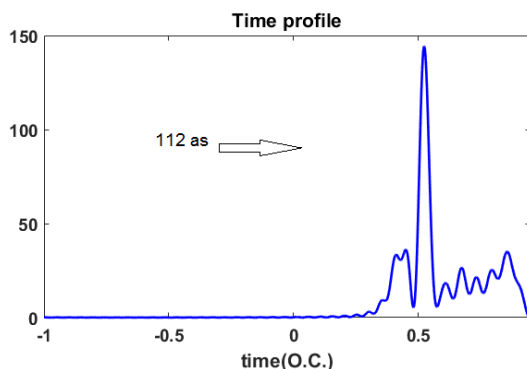


شکل ۲: پالس آتوتانیبه تولید شده توسط میدان لیزری سه رنگ



شکل ۳: نمودار پارامتر چیرپ بر حسب هماهنگ ها که بیشینه ی آنها در ۶٫۲۵ می باشد.

طبق شکل (۳) با تغییر پارامتر چیرپ از ۵ تا ۷ بیشینه ی فرکانس قطع هماهنگ ها در  $\beta = 6.25$  حاصل شد [5]. پالس به دست آمده از این تغییر، در شکل (۴) به نمایش گذاشته شده است. پالسی به پهنای 112 as با برهم نهی هماهنگ های 123-179 تولید شد که نسبت به پالس حاصل از میدان لیزری بدون چیرپ مطلوب تر است.



### ۳- تجزیه و تحلیل

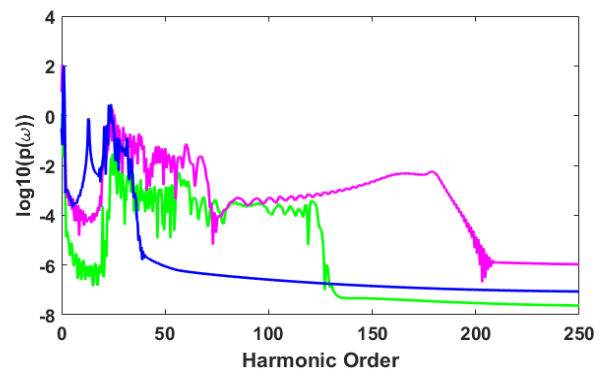
در ابتدا، طیف هماهنگ های مرتبه ی بالا را برای سه میدان لیزر تک رنگ، دو رنگ و سه رنگ مورد بحث و مقایسه قرار می دهیم. میدان های انتخابی دارای شرایطی بدین شرح هستند:

$$\lambda_1 = 800nm, \lambda_2 = 1600nm, \lambda_3 = 2400nm$$

$$I_2 = 1.2 \times 10^{14} W/Cm^2, I_1 = 1 \times 10^{14} W/Cm^2$$

،  $I_3 = 1.5 \times 10^{14} W/Cm^2$  و  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 2.5fs$ ،  $\varphi_1 = \pi, \varphi_2 = 0, \varphi_3 = -\pi/2$  که پارامترهای وابسته به میدان اصلی هستند.

همانطور که در شکل (۱) پیداست، طیف هماهنگ های مرتبه ی بالا در لیزر سه رنگی از ناحیه ی تخت گسترده تر و در نتیجه از فرکانس قطع بالاتری نسبت به دو رقیب تک رنگ و دو رنگ خود برخوردار است. نوسانات کم، فرکانس قطع بالاتر و همچنین بازده ی بهینه ی طیف هماهنگ ها در میدان لیزری سه رنگ سبب می شود تا این میدان به عنوان میدان الکترونیکی لیزر فرودی بر گاز مورد آزمایش (He) جهت تولید پالس آتوتانیبه برگزیده شود. [4]



شکل ۱: طیف هماهنگ های مرتبه ی بالا برای میدان لیزر تک رنگ (نمودار آبی)، لیزر دو رنگ (نمودار سبز) و لیزر سه رنگ (نمودار بنفش)

در شکل (۲) با برهم نهی هماهنگ های ۱۸۰-۱۳۰ از طیف هماهنگ های حاصل از میدان لیزری سه رنگ پالس 158 as حاصل شد که تک پالس منفرد مطلوبی نبوده است. پیرو دستیابی به تک پالس منفرد با کمینه ی پهنای در نیم بیشینه و شدت مطلوب و همچنین طیف هماهنگ هایی با فرکانس قطع بالاتر و ناحیه ی تخت گسترده تر بر آن شدیم تا فاز وابسته به زمان غیرخطی، "چیرپ"، را در میدان اصلی

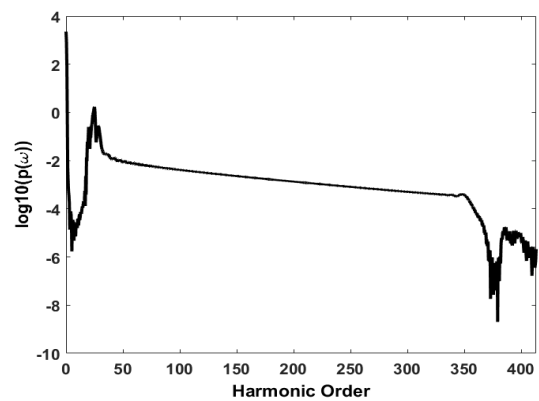
چیرپ تنها به میدان اصلی و چیرپ دار شدن تمامی میدان های اصلی، کنترلی اول و دوم با حل معادله ی شرودینگر وابسته به زمان تک بعدی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که وارد نمودن چیرپی با مقدار بهینه ی پارامتر چیرپ ( $\beta$ ) مسبب افزایش دامنه ی میدان های فرودی و در نتیجه ی آن افزایش شدت پالس تولید شده و افزایش فرکانس قطع می شود [6]. در این مقاله با وارد نمودن چیرپ در  $\beta \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right) -$  و بهینه مقدار ۶,۲۵ برای پارامتر چیرپ در هر سه میدان لیزر سه رنگی به پالس کوتاه 79 as تولید شد.

### مراجع

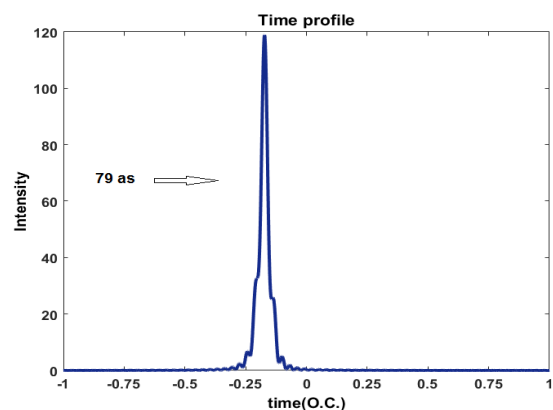
- [1] M.hentschel, R. kieninger, Ch. spielmann et al., Nature 414, 509(2001)
- [2] Platonenko, V. T., Sterjantov, A. F., and Strelkov, V. V., *Laser Physics*, Vol. 13, No. 4, 2003, pp. 443-449.
- [3] Xu Cao, I Shicheng Jiang, I Chao Yu, I Yunhui Wang, I Lihua Bai, 2,4 and Ruifeng Lu 1,3,\* " Generation of isolated sub-10-attosecond pulses in spatially inhomogenous two-color fields", Optical Society of America-(211)
- [4] Peng-Cheng Li, I-Lin Liu, Shih-I Chu, "Optimization of three-color laser field for the generation of single ultrashort attosecond pulse", Optical Society of America-(2011)
- [5] Liqiang Feng<sup>1</sup> and Tianshu Chu<sup>1,2</sup>, " Generation of an isolated sub-40-as pulse using two-color laser pulses: Combined chirp effects", PHYSICAL REVIEW A **84**, 053853-(2011)
- [6] Zenghu Chang: "Fundamentals of Attosecond Optics"; 1st edition; Taylor and Francis group (2011), chapter 4

شکل ۴: پالس آتو ثانیه از میدان لیزری سه رنگی که تنها میدان اصلی چیرپ دار است

با در دست داشتن پارامتر چیرپ بهینه، چیرپ به تمام میدان های اصلی، کنترلی اول و دوم در میدان لیزر سه رنگی افزوده می شود. طیف همافنگ های حاصل شده از ناحیه ی تخت بسیار هموارتر، گسترده تر و همچنین فرکانس قطع بالاتری نسبت به حالات قبل برخوردار است. همانطور که از شکل (۵) و شکل (۶) پیداست، موقعیت بسامد قطع طیف در هارمونیک 350 ام است همچنین پالس 79as با بر هم نهی همافنگ های 260-350 تولید شده است.



شکل ۵: طیف همافنگ های مرتبه ی بالا حاصل از میدان لیزری که هر سه میدان اصلی، کنترلی اول و دوم چیرپ دار شده اند



شکل ۶: تک پالس منفرد آتو ثانیه حاصل از میدان لیزری که هر سه میدان اصلی، کنترلی اول و دوم چیرپ دار شده اند

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله تولید همافنگ های مرتبه ی بالا با استفاده از میدان لیزری سه رنگی در حالت بدون چیرپ، با اعمال