



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.



۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۴۹۶-۱۰-A

## بررسی تابع توزیع انرژی الکترون ها در پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی

زهرة دهقانی<sup>۱</sup>، محمد جعفر جعفری<sup>۱\*</sup>، الناز خلیل زاده<sup>۱</sup>، امیر چخماچی<sup>۱</sup>، سمیه رضایی<sup>۱</sup>

۱- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

چکیده - در این مقاله، اثر یونیزاسیون بر روی طیف انرژی الکترون ها در برهمکنش پالس قوی لیزر با اتم های هیدروژن، با استفاده از کد شبیه سازی PIC بررسی شده است. نتایج بررسی ها نشان می دهد که برای پالس هایی با زمان خیزش طولانی (در اینجا ۶۰ fs و ۷۵ fs)، الکترون ها به انرژی های بالاتری در پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی، نسبت به پلاسمای پیش فرض، دست پیدا می کنند که این می تواند به دلیل تولید تابش های رامان رو به عقب قویتر در پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی باشد. این تابش ها، به دلیل نوسانات چگالیتولید می شوند که باعث رخ دادن سریع آشوب شده و الکترون ها را از طریق سازوکار کیهاتیکی، شتابدار می کنند.

کلید واژه- انرژی الکترون ها، برهمکنش لیزر با گاز، تابع توزیع، یونیزاسیون میدانی.

## The investigation of the energy distribution function of electrons in field ionized plasma produced

Z. Dehghani<sup>1</sup>, M. J. Jafari<sup>1\*</sup>, E. Khalilzadeh<sup>1</sup>, A. Chakhmachi<sup>1</sup>, S. Rezaei<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Plasma and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX: 14395-836, Tehran, Iran

**Abstract:** In this paper, the effect of ionization on the energy spectrum of electrons produced in the interaction of a laser with hydrogen atoms is investigated using the PIC simulation code. The results show that at longer rise-time pulses (here 60 and 70 fs), electrons achieve higher energies in the field-ionized plasma than in the case of pre-plasma. In this case, because of density fluctuations in the field-ionized plasma, the Raman backscattered radiations are seeded by a strong initial noise at the earlier times and the Mendonca condition for chaos threshold is met sooner. Therefore, the electrons gain more energy through the stochastic mechanism that is in agreement with chaotic nature of the motion.

**Keywords:** Electron energy, Interaction between laser and gas, Electron energy distribution function, Field-ionized plasma.

## مقدمه

یکی از جالب‌ترین ویژگیها در فیزیک لیزر-پلازما، توانایی برهم کنش تابش شدید لیزر با پلازما در تولید الکترون‌های بسیار پرانرژی است که امروزه به دلیل کاربردهای زیادی از جمله شتاب یونی، تولید اشعه ایکس و تولید پوزیترون، توجهات زیادی را به سمت خود جلب کرده اند [۱-۳]. در این برهمکنش، سازوکارهای مختلفی مانند شتاب میدان عقبه، شتاب لیزر مستقیم و گرمایش تصادفی برای توصیف شتاب الکترون‌ها در این سیستم وجود دارد. این موضوع، تاکنون در بسیاری از کارها به صورت تحلیلی، عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در میان این سازوکارها، گرمایش تصادفی نقش اساسی در شتابدهی الکترون‌ها در پلازما دارد.

در بسیاری از مطالعات مربوط به برهم کنش پالس قوی لیزر (پالس‌های کوتاه نانو و پیکو ثانیه) با پلازما، به دلیل اینکه در ابتدای پالس لیزر و قبل از رسیدن بخش اصلی پالس یونیزاسیون اتفاق می‌افتد، مرحله یونیزاسیون و تشکیل پلازما بواسطه برخورد لیزر با ماده جامد یا گاز در نظر گرفته نمی‌شود [۴]. در حالی که در این بررسی‌ها، نشان داده شده است که اثرات پیش پالس و انرژی که صرف یونیزاسیون میدانی می‌شود، نیز می‌تواند بر روی شدت انتشار پالس اصلی، تاثیرگذار باشد. ویژگی میدان‌های عقبه، که توسط پالس‌های لیزر در پلازماهای یونیزه شده با میدان لیزر، تولید شده‌اند، به صورت تحلیلی و عددی در کارهای قبلی مورد بررسی قرار گرفته است.

بعلاوه، برخی از کارهای اخیر بر گسترش انرژی برای فرآیند تزریق یونیزاسیون در محیط گاز متمرکز شده است. که در این کارها، کیفیت الکترون‌های شتابدار با توزیع چگالی و طیف انرژی، برای این الکترون‌ها مشخص شده

است. علاوه بر این، اثر تزریق ناشی از یونیزاسیون، با تنظیم ترکیبیک گاز هدف، بر عملکرد خود مدولاسیون و شتاب میدان عقبه لیزر مورد مطالعه قرار گرفت [۵-۷]. هدف از این کار، بررسی اثر نوسانات چگالیبا در نظر گرفتن یونیزاسیون، بر روی طیف نهایی انرژی الکترون‌ها است. همان طور که می‌دانید، یونیزاسیون به دلیل تولید نیروی پاندروموتیو می‌تواند باعث تولید تابش شود بنابراین انتظار می‌رود بر روی انرژی الکترون‌ها تاثیرگذار باشد. در این راستا شبیه‌سازیهای مختلفی با ۲ پالس به طول fs ۳۰۰ و با زمان‌های خیزش مختلف fs ۶۰ و ۷۵ به صورت نمونه انجام گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان می‌داد که برای پالس‌هایی با زمان خیزش طولانی (در اینجا fs ۶۰ و ۷۵)، الکترون‌ها به انرژی‌های بالاتری در پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی، نسبت به پلاسمای پیش فرض، دست پیدا می‌کنند.

## شبیه‌سازی مساله و نتایج آن

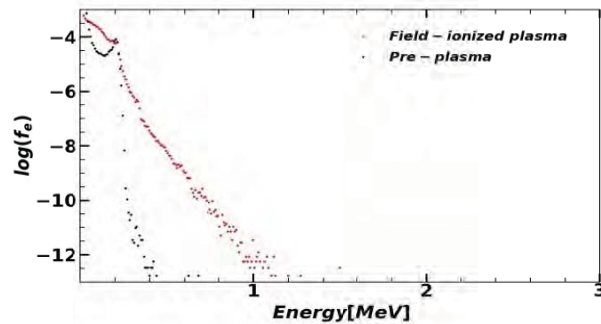
برای جلوگیری از تکرار شدن پارامترهای شبیه‌سازی در تمام این بخش، این پارامترها قبل از ارائه نتایج شبیه‌سازی بیان می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد شبیه‌سازی اسمایلی که تک بعدی در مکان و سه بعدی در سرعت می‌باشد، انجام شده است. پالس لیزر دارای طول موج  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  و دامنه میدان الکتریکی بی‌بعد شده  $a_0 = 1$  است که  $a_0^2 = I \lambda_\mu^2 / 1.37 \times 10^{18}$ . برای تمامی نتایج شبیه‌سازی، پلازما با پروفایل اولیه پله‌ای در محدوده  $x = [85 - 220] \mu\text{m}$  در نظر گرفته شده است. برای داشتن وضوح و دقت قابل قبول در شبیه‌سازی، در هر طول موج لیزر، ۲۷۰۰۰ سلول شبیه‌سازی که داخل هر کدام ۴۸ ابر ذره وجود دارد قرار دارد. طول مکانی هر سلول شبیه‌سازی در حدود  $DX / \lambda_D \approx 0.01$  می‌باشد. در

نسبت به پلاسمای پیش فرض، با انرژی بیشتری تولید میشوند. این در حالی است که در حالت پلاسمای پیش فرض، حداکثر انرژی الکترون ها به کمتر از ۴ MeV می رسد، در حالی که در پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی، این مقدار دو برابر می گردد. علاوه بر این، در این زمان های خیزش، برای پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی، توزیع الکترونی گسترده تر است و با شیب نرمی کاهش مییابد، در حالی که در پلاسمای پیش فرض به صورت ناگهانی افت می کند. این بدان معناست که بیشینه انرژی الکترونی و دمای آنها، برای حالتی که از پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی استفاده می شود، بیشتر است.

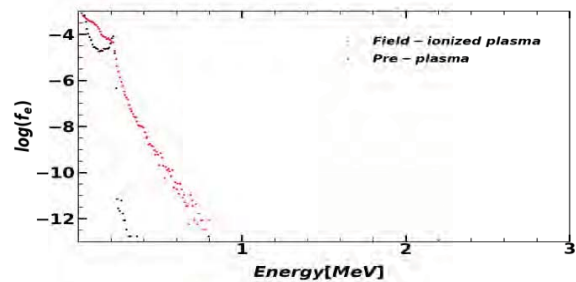
برای مطالعه بیشتر این موضوع، نمودار میدان الکتریکی و فضای فاز الکترون ها، برای ۲ پالس مطرح شده در بالا، مورد بررسی قرار گرفت. میدان عقبه تولیدی  $(E_x)$ ، میدان الکتریکی عرضی لیزر  $(E_y)$ ، اندازه حرکت  $(p_x)$  و چگالی الکترون  $(n_x)$  در زمان  $a_0=1$  و  $n_0 = 0.02n_{cr}$  برای پالس  $[60, 180, 60]$  fs، هیدروژن  $a_0=1$  و  $n_0 = 0.02n_{cr}$  برای پالس  $[70, 160, 70]$  fs، در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است. هر شکل از دو صفحه تشکیل می شود: (الف) انتشار پالس لیزر در پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی و (ب) انتشار پالس لیزر در پلاسمای پیش فرض. همانطور که در این شکل ها دیده می شود، عملکرد منحنی های میدان الکتریکی و فضای فاز، در دو محیط متفاوت می باشند. نتایج تحقیقات قبلی [۸ و ۴] نشان می داد که برای افزایش به نرمی پالس، تابش های رامن رو به عقب در زمان های اولیه برهمکنش لیزر و محیط تولید می شود.

تمام این کار، مقادیر، موقعیت  $(x)$  و میدان الکتریکی طولی  $(E_x)$  به ترتیب به  $\lambda$  و  $\omega_0 m_e c / q_e$  نرمالیزه شده اند  $(q_e)$  و  $\omega_0$  به ترتیب، بارالکترونی و فرکانس لیزر می باشد).

برای بررسی تأثیر یونیزاسیون بر طیف انرژی الکترون ها در برهم کنش پالس لیزر با اتم های هیدروژن، شبیه سازی های مختلفی با پالس لیزری با زمان خیزش ۶۰ fs انجام گرفت. شکل های ۱ و ۲، طیف انرژی الکترون ها را برای دو پالس  $[60, 180, 60]$  و  $[70, 160, 70]$  fs در چگالی اتم هیدروژن  $a_0=1$  و  $n_0 = 0.02n_{cr}$  در زمان ۶۵۰ fs به ترتیب نشان می دهند.



شکل ۱: طیف انرژی الکترون ها را برای پالس  $[60, 180, 60]$  fs در چگالی اتم هیدروژن  $a_0=1$  و  $n_0 = 0.02n_{cr}$  در زمان ۶۵۰ fs.



شکل ۲: طیف انرژی الکترون ها را برای پالس  $[70, 160, 70]$  fs در چگالی اتم هیدروژن  $a_0=1$  و  $n_0 = 0.02n_{cr}$  در زمان ۶۵۰ fs.

در هر یک از این شکل ها، طیف انرژی الکترون ها برای دو حالت پلاسمای میدان یونیزه و پیش پلاسمای مقایسه می شود. نتایج نشان می دهد که، الکترون ها در شرایطی که از پلاسمای حاصل از یونیزاسیون میدانی استفاده می شود،

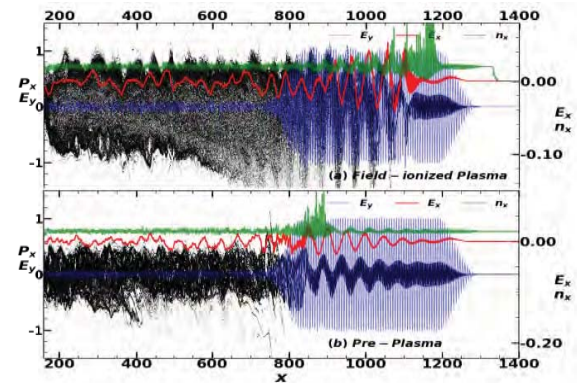
ارضا می گردد. این می تواند به این دلیل باشد که ناپایداری های پارامتری مانند رامان، می توانند توسط نوسان چگالی تغذیه شوند. در نتیجه، تابش رامان رو به عقب به دلیل یونسزاسیون می تواند از یک اختلال سطح بالا رشد کرده و به سرعت به محدوده مورد نیاز برای وقوع آشوب برسد. سازوکار مشابهی نیز برای پالس با زمان خیزش ۷۰ fs سازگار است (شکل ۴).

### نتیجه گیری

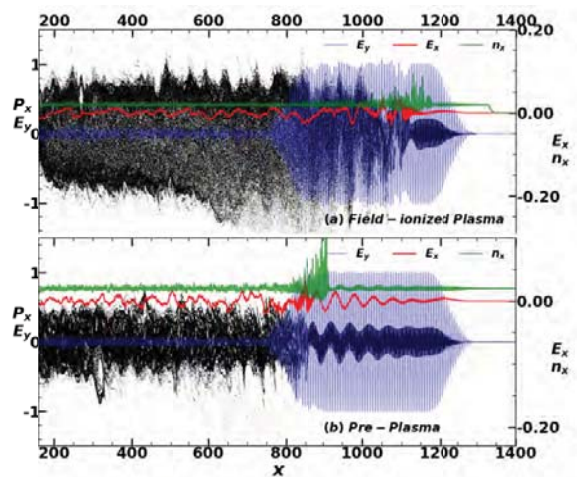
در این کار، تأثیر نوسانات چگالی در طیبونیزاسیون بر روی طیف انرژی الکترون ها بررسی شده است. همانطور که می دانید، فرآیند یونسزاسیون می تواند چندین نوع تشعشع را به دلیل تولید نیروی پاندرماتیو و شیب دار تولید کند و انتظار می رود که بر روی انرژی الکترون ها تأثیر بگذارد. در این راستا، شبیه سازی های مختلف با ۲ پالس با زمان خیزش ۶۰ fs و ۷۰ و طول ۳۰۰ fs مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد، برای پالس هایی با زمان خیزش طولانی (در اینجاست ۶۰ و ۷۵)، الکترون ها به انرژی های بالاتری در پلاسمای حاصل از یونسزاسیون میدانی، نسبت به پلاسمای پیش فرض، دست پیدا می کنند.

### مرجع ها

1. Strickland, D. and G. Mourou. Optics communications, 1985. **56**(3): p. 219-221.
2. Mourou, G.A., C. Barty, and M.D. Perry. 1997, Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).
3. d'Humières, E., et al.,. Physics of plasmas, 2005. **12**(6): p. 062704.
4. Khalilzadeh, E., A. Chakhmachi, and J. Yazdanpanah. Optik, 2020. **218**: p. 165249.
5. Andreev, N., et al. Plasma Physics Reports, 2000. **26**(11): p. 947-959.
6. Kumar, P., et al.,. Physics of Plasmas, 2019. **26**(8): p. 083106.
7. Lin, M.-W., et al. Physics of Plasmas, 2020. **27**(1): p. 013102.
8. Khalilzadeh, E., A. Chakhmachi, and J. Yazdanpanah. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2017. **59**(12): p. 125004.



شکل ۳: میدان عقبه تولیدی ( $E_x$ ), میدان الکتریکی عرضی لیزر ( $E_y$ ), اندازه حرکت ( $P_x$ ) و چگالی الکترون ( $n_x$ ) در زمان ۶۰۰ fs برای چگالی اتم های هیدروژن  $n_0 = 0.02n_c$  و  $a_0 = 1$  برای پالس [۶۰، ۱۸۰، ۶۰] fs.



شکل ۴: میدان عقبه تولیدی ( $E_x$ ), میدان الکتریکی عرضی لیزر ( $E_y$ ), اندازه حرکت ( $P_x$ ) و چگالی الکترون ( $n_x$ ) در زمان ۶۰۰ fs برای چگالی اتم های هیدروژن  $n_0 = 0.02n_c$  و  $a_0 = 1$  برای پالس [۷۰، ۱۶۰، ۷۰] fs.

در این حالت، اگر دامنه این تابش های رامان عقبی از حد آستانه مندونکا فراتر رود، آشوب رخ می دهد. در شکل (۳)، به دلیل پالس با زمان خیزش بلند، الگوی آشوب در منحنی فضای فاز کاملاً واضح است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، آشوب در پلاسمای حاصل از یونسزاسیون میدانی زودتر اتفاق افتاده است. با توجه به آنچه در بالا ذکر شد، به نظر می رسد که به دلیل نوساناتی که در طیبونیزاسیون گاز در چگالی رخ می دهد، میدان عقبی رامان افزایش بیشتری یافته و معیار مندونکا زودتر