

تأثیر محیط پلاسما بر انتشار نقطه تمرکز پویای پالس

آلاله قاسمی کلیجی^۱، سعید میرزانهژاد^{۱*}، میثم تقی پور^۱ و محمد ملک محمودی^۱

^۱ دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک اتمی و مولکولی

*آدرس رایانامه نویسنده مسئول: saeed@umz.ac.ir

کلید واژه: پالس چرپ، تمرکز پویا، عدسی کروماتیک

چکیده

هدف از این مقاله شبیه سازی نقطه تمرکز پویا و بررسی آن در محیط پلاسما می باشد. بدین منظور پالس گوسی با چرپ خطی و از یک عدسی با پاشندگی رنگی قوی (هایپرکروماتیسیتی) خطی عبور داده شد، در نتیجه قله شدت پالس با سرعت دلخواه حتی بیشتر از سرعت نور هم در جهت انتشار پالس و هم در خلاف جهت انتشار پالس حرکت می کند. نکته قابل توجه اینکه پالس می تواند در مسافت های بزرگ شکل خود حفظ کند. در این شبیه سازی ضریب کروماتیسیتی ثابت فرض شد و با تغییر پارامتر چرپ منفی سرعت نقطه تمرکز پویا تنظیم می شود. با در نظر گرفتن محیط پلاسما در سرعت قله شدت پالس تغییراتی مشاهده شد که با توجه به جهت حرکت نقطه تمرکز پویا این تغییرات متفاوت بود.

Plasma effects on flying focus propagation

Alaleh Ghasemi Kalijy¹, Saeed Mirzanejhad^{1*}, Meisam Taghipour¹ and Mohammad MalekMahmodi¹

¹ Department of Atomic and Molecular, Faculty of Sciences, Mazandaran University

*corresponding e-mail: saeed@umz.ac.ir

Abstract

The purpose of this paper is to simulate the flying focus in plasma. For this purpose, the Gaussian pulse with linear chirp and passed through a hyper-chromatic lens, as a result, the peak intensity of the pulse moves at the arbitrary velocity even superluminal, both in co-propagation and counter-propagation. It is notable that the pulse can retain its shape in large distances. In this simulation, the chromaticity coefficient was assumed to be constant and the flying focus velocity was adjusted by changing the negative chirp parameter. Considering the plasma, changes were observed in the pulse intensity peak velocity, which varied according to the flying focus direction.

Keywords: Chirped Pulse, Flying Focus, Chromatic Lens

مقدمه

افزایش طول تمرکز یا استفاده از موج بر برای حفظ قطر لکه کوچک در مسافت طولانی لازم است [۲]. برای اولین بار، محققان آزمایشگاه انرژی لیزری دانشگاه روچستر راهی برای استفاده از نقطه تمرکز پویا برای کنترل بهتر شدت لیزرها در مسافت های طولانی پیدا کرده اند [۳]، که محدودیت های موجود سیستم های قدیمی را مرتفع ساخت [۴]. در واقع نقطه تمرکز پویا با سرعت هایی کمتر و یا بیشتر از سرعت نور، از ترکیب یک پالس لیزر چرپ با یک عدسی

بسیاری از کاربردهای مبتنی بر لیزر مانند تولید پالس تراهرتز و هارمونیک مرتبه بالا، شتاب میدان عقبه و تقویت کننده لیزر-پلاسما نیاز به انتشار پالس در فواصل طولانی دارد و همچنین لازم است سرعت انتشار قله شدت لیزر با آن فرآیند فیزیکی خاص هم خوانی داشته باشد [۱]. در سیستم های لیزری متداول طول تمرکز لیزر به حداقل قطر لکه لیزر وابسته است در نتیجه به قطر لکه بزرگ برای



معادله سرعت نقطه تمرکز پویا برای محیط پلاسما نیز بر همین اساس به صورت زیر تعریف می شود [۱]:

$$\frac{v_f}{v_g} = \left(1 \pm \frac{Tv_g}{l}\right)^{-1} \quad (2)$$

در معادلات بالا c و v_g به ترتیب سرعت نور در خلا و سرعت گروه پالس در پلاسما هستند. همانطور که از رابطه مشخص است با تنظیم پارامترهای عدسی و چرپ شدگی برای چرپ منفی قله شدت لیزر با هر سرعت دلخواه (کمتر یا بیشتر از سرعت نور^۱) هم در جهت انتشار پالس (رو به جلو) یا در خلاف جهت پالس (رو به عقب) منتشر می شود. در نتایج آزمایشگاهی به سرعت های $0.09c$ - تا $39c$ دست یافتند و همچنین توانستند که در $4.5mm$ (در حدود 100 برابر طول ریلی) قله شدت را تقریباً ثابت نگه دارند [۱].

در مقاله حاضر، مدل سازی عددی دینامیک نقطه تمرکز پویا با هدف دستیابی به سرعت های کمتر و بیشتر از سرعت نور در هر دو جهت رو به جلو و رو به عقب در محیط پلاسما بررسی شده است.

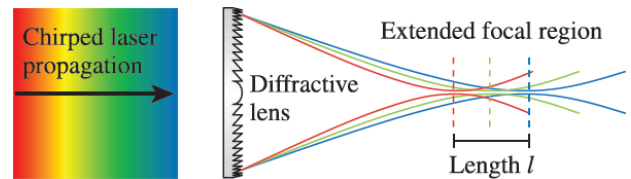
پارمترها و روش عددی محاسبات

به منظور شبیه سازی پدیده نقطه تمرکز پویا برنامه در نرم افزار *Fortran90* نوشته شد. در این برنامه پرتو گوسی از برهم نهی تعداد $N=10000$ مد طولی که فاصله بین دو مد طولی متوالی $\Delta v = 94.5GHz$ است، در طول موج مرکزی $\lambda_0 = 800\mu m$ و با طول پالس $\tau = 500fs$ بدست آمده است. با استفاده از یک تبدیل فوریه روی میدان الکتریکی وابسته به زمان $E(t)$ میدان الکتریکی وابسته به فرکانس $E(v)$ به دست می آید. چرپ شدگی خطی با پارامتر بدون بعد η روی پالس اعمال می شود، که تاثیر چرپ روی فاز هر مولفه میدان به صورت زیر تعریف شده است:

$$\varphi = \eta(\omega - \omega_0)^2 \quad (3)$$

با توجه به پژوهش های آزمایشگاهی پیشین که سرعت های کمتر و بیشتر از سرعت نور در دو جهت رو به جلو و عقب در چرپ

کروماتیک ایجاد می شود - یک نقطه تمرکز لیزری که به صورت پویا در زمان حرکت می کند. مطابق شکل (۱)، این امر کنترل انتشار قله شدت لیزر را در یک ناحیه کانونی گسترده فراهم می کند که می تواند چندین برابر بیشتر از طول ریلی سیستم باشد [۵]. زمانی که یک پالس چرپ با مدت زمان T (علامت T نشان دهنده جهت چرپ است) از یک عدسی کروماتیک (که هر فرکانس را در مکان خاصی متمرکز می کند) عبور کند، یک ناحیه تمرکز با طول L (در واقع L فاصله بین نقطه تمرکز کمترین فرکانس و بیشترین فرکانس می باشد) را ایجاد می کند. به طور کلی، هر فرکانس در یک زمان خاص به بهترین تمرکز خود می رسد و سرعت حرکت مکان بهترین تمرکز برای چرپ خطی با نسبت T/L تعیین می شود. که با تنظیم این نسبت، از دیدگاه تئوری قله شدت پالس را با هر سرعتی از $-\infty$ تا $+\infty$ می توان منتشر ساخت [۵].



شکل ۱. نمایی از نقطه تمرکز پویا [۵].

برای محاسبه سرعت قله شدت پالس باید این مورد را در نظر گرفت که هر فرکانس علاوه بر مکان متفاوت، در زمان متفاوتی متمرکز می شود، فاصله زمانی کانونی شدن هر فرکانس از دو بخش تشکیل می شود، بخش اول حاصل از عدسی کروماتیک است که از تقسیم فاصله کانونی هر فرکانس بر سرعت نور بدست می آید. بخش دوم حاصل چرپ شدگی و زمان نسبی فرکانس در پالس می باشد، که در نتیجه سرعت تمرکز پویا در خلا به صورت زیر تعریف می شود [۳، ۶]:

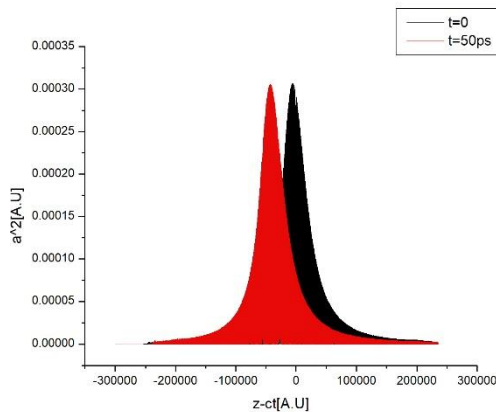
$$\frac{v_f}{c} = \left(1 \pm \frac{Tc}{l}\right)^{-1} \quad (1)$$

در رابطه علامت مثبت برای چرپ مثبت و علامت منفی برای چرپ منفی می باشد.

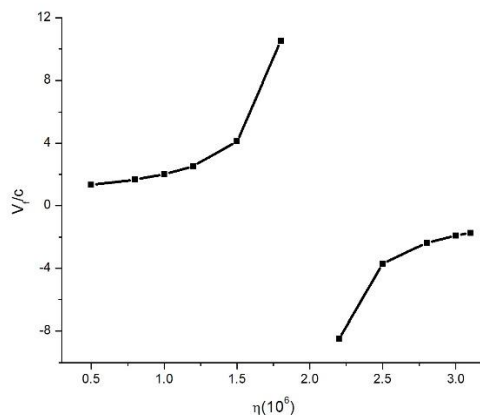
¹ Subluminal or Superluminal



در نمودار ۳ سرعت حرکت قله شدت پالس بر حسب ضریب چرپ منفی رسم شده است. در شبیه سازی تمام مقادیر η منفی جایگذاری شد. نمودار رسم شده با نمودار مربوط به معادله (1) برای چرپ منفی کاملاً هم خوانی دارد [۳, ۶] و سرعت های بیشتر از سرعت نور چه رو به جلو و چه رو به عقب مشاهده می شوند.



نمودار ۲. نقطه تمرکز پویا با سرعت $3.7c$



نمودار ۳. نمودار سرعت نقطه تمرکز پویا بر حسب پارامتر چرپ η

در ادامه و در نمودار ۴ دینامیک نقطه تمرکز پویا در پلاسمایی با $\omega_p = 0.1\omega_0$ مورد بررسی قرار گرفت. در این نمودار مقایسه بین سرعت نقطه تمرکز پویا رو به جلو در مقادیر کوچک چرپ شدگی برای محیط پلاسما و خلا نشان داده شده است. نمودار ۴ نشان می دهد که سرعت نقطه تمرکز پویای رو به جلو در محیط پلاسما نسبت به خلا کاهش پیدا کرده است.

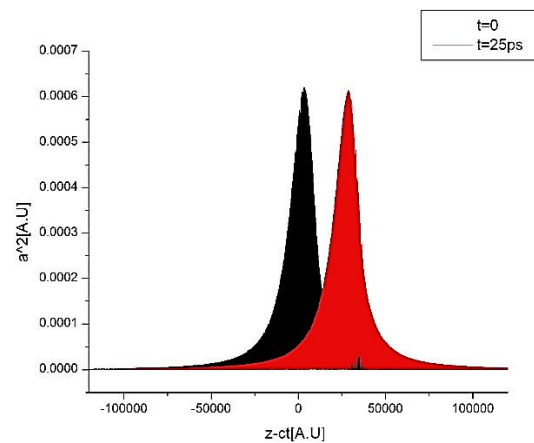
منفی گزارش شد [۳]، در شبیه سازی حاضر نیز پارامتر η منفی در نظر گرفته شد. در ادامه برنامه مربوط به عبور پالس از یک عدسی کروماتیک با ضریب خطی α بصورت زیر نوشته شد:

$$f = f_0 + \alpha (\omega - \omega_0) \quad (4)$$

برای بررسی تاثیر محیط پلاسما بر دینامیک نقطه تمرکز پویا، محیط پلاسمایی با بسامد $\omega_p = 0.1\omega_0$ در نظر گرفته شد.

بحث و نتایج عددی

می دانیم با تاثیر همزمان چرپ و عدسی کروماتیک روی یک پرتو گوسی، قله شدت پالس با سرعت دلخواهی حرکت می کند. در اینجا با ثابت نگه داشتن ضریب α ، تاثیر میزان چرپ شدگی پالس بر روی سرعت نقطه تمرکز پویا با پارامتر چرپ η مورد بررسی قرار گرفت. در نمودار ۱ برای $\eta = -1.2 * 10^6$ شدت پالس در زمان $t=0$ و $t=25ps$ رسم شده است، که در واقع قله شدت پالس مطابق نمودار بدون تغییر در این بازه زمانی با سرعت معادل $2.5c$ رو به جلو حرکت کرده است (در منحنی ها از کمیت های بدون بعد استفاده شده است).



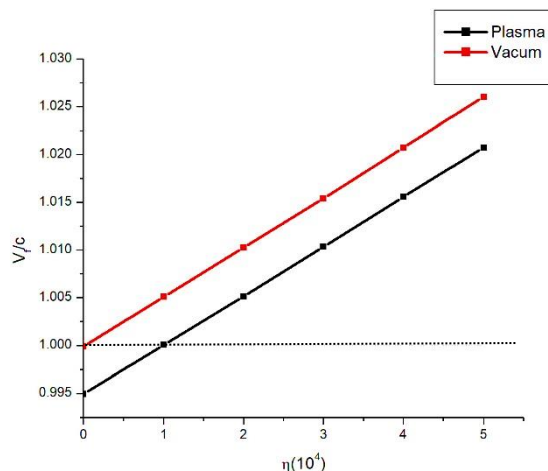
نمودار ۱. نقطه تمرکز پویا با سرعت $+2.5c$

همچنین در نمودار ۲ برای $\eta = -2.5 * 10^6$ شدت پالس در زمان $t=0$ و $t=25ps$ رسم شده است، که در واقع قله شدت پالس مطابق نمودار بدون تغییر در این بازه زمانی با سرعت معادل $3.7c$ رو به عقب حرکت کرده است.

توان از خصوصیات نقطه تمرکز پویا در کاربرد های مبتنی بر برهمکنش لیزر-پلاسما استفاده نمود.

مرجع ها

1. Froula, D., et al., *Flying focus: Spatial and temporal control of intensity for laser-based applications*. Physics of Plasmas, 2019. **26**(3): p. 032109.
2. Froula, D., et al., *Magnetically controlled plasma waveguide for laser wakefield acceleration*. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2009. **51**(2): p. 024009.
3. Froula, D.H., et al., *Spatiotemporal control of laser intensity*. Nature Photonics, 2018. **12**(5): p. 262-265.
4. Sainte-Marie, A., O. Gobert, and F. Quere, *Controlling the velocity of ultrashort light pulses in vacuum through spatio-temporal couplings*. Optica, 2017. **4**(10): p. 1298-1304.
5. Turnbull, D., et al., *Flying focus and its application to plasma-based laser amplifiers*. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018. **61**(1): p. 014022.
6. Palastro, J., et al., *Ionization waves of arbitrary velocity driven by a flying focus*. Physical Review A, 2018. **97**(3): p. 033835.
7. Palastro, J., et al., *Laser-plasma acceleration beyond wave breaking*. Physics of Plasmas, 2021. **28**(1): p. 013109.
8. Caizergues, C., et al., *Phase-locked laser-wakefield electron acceleration*. Nature Photonics, 2020. **14**(8): p. 475-479.



نمودار ۴. نمودار سرعت نقطه تمرکز پویا روبه جلو محیط پلاسما و خلا

نکته قابل تامل در نمودار بالا محل برخورد منحنی سیاه با مقدار سرعت نور است. در واقع با انتخاب مناسب پارامترها از جمله میزان چرپ شدگی پالس می توان سرعت نقطه تمرکز پویا را با سرعت نور هماهنگ کرد. این اتفاق می تواند نتایج خیره کننده ای در مفاهیم برهمکنش پالس های لیزری پرشدت با محیط پلاسما بگذارد. اخیرا اهمیت این موضوع در شتاب لیزری میدان عقبه در مقالاتی به چاپ رسیده است [۷, ۸]. از جمله می توان به رفع مشکل شکست موج^۲ و رفع محدودیت مربوط به طول وافازی^۳ اشاره کرد.

نتیجه گیری

در مقاله حاضر دینامیک نقطه تمرکز پویا در محیط پلاسما مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی انجام شده نشان می دهد که با در نظر گرفتن چرپ منفی می توان به سرعت های بزرگتر از سرعت نور هم در جهت انتشار پالس و هم در خلاف جهت آن دست یافت. نکته قابل توجه این است که شکل پالس در مسافت هایی از مرتبه طول ریلی تقریبا بدون تغییر می ماند. همچنین در انتها شرایط لازم برای رسیدن سرعت تمرکز پویا در محیط پلاسما به سرعت نور مورد بررسی قرار گرفت و اهمیت آن در شتاب دهنده لیزری میدان عقبه تذکر داده شد. در پژوهش های آینده می

³ Dephasing length

² Wave-breaking