



تأثیر ترکیب هدف بر شتابدهی پروتون در اندرکنش پالس لیزر پرشدت با فویل نازک

حسن وثوقیان، فرشته حاج اسماعیل بیگی، محمدرضا رشیدیان وزیری

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران-ایران

چکیده:

در این مقاله اندرکنش یک پالس لیزری پرشدت با یک هدف جامد مرکب از یونهای کربن و هیدروژن بوسیله شبیه سازی ۲ بعدی ذره در جعبه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این شبیه سازی‌ها تأثیر نسبت چگالی یونهای تشکیل دهنده هدف بر روی شتابدهی ذرات پروتون بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که در یک ترکیب با نسبت چگالی پروتون به کربن پائین (در حدود ۱۰ درصد)، فرآیند شتابدهی منجر به تولید پروتونهایی با طیف انرژی شبه تک انرژی خواهد شد درحالیکه در نسبت چگالی بالا (در حدود ۱۲۰ درصد)، پروتونهایی با یک طیف انرژی گسترده و انرژی قطع بیشتر تولید خواهد شد. در واقع با افزایش نسبت چگالی یونها، نیروی کولومبی یونهای سنگین کربن بر نیروی فشار تابش لیزر غلبه خواهد کرد که سبب انفجار کولومبی یونهای کربن و انتقال انرژی بیشتر به پروتونهای شتاب داده شده خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: فشار تابش لیزر، پروتون، پالس لیزر پرتوان، شتابدهنده لیزری

The effect of target composition on proton acceleration in the interaction of high-intensity laser pulse with thin foil

Hassan Vosoughian, Fereshteh hajiesmaeilbaigi, Mohammad Reza Rashidian Vaziri

Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14399511-13, Tehran - Iran

Abstract:

In this paper, the interaction of a high-intensity laser pulse with a solid target, composed of mixture of carbon and hydrogen ions, is investigated by 2D particle in cell simulations. In this study, the effect of the density ratio of the target ions on the acceleration of proton particles is considered. The results indicate that, at low density ratio of the protons to carbon ions (about 10%), the acceleration process leads to the production of a quasi-mono-energetic protons beam, while at the high-density ratios (about 120%), the proton particles with the spectrum of higher cut-off energy are produced. In fact, by increasing the ion density ratio, the coulomb force of the carbon ions overcomes the radiation pressure of laser pulse which causes the Columbine explosion of the carbon ions and transfer more energy to the accelerated protons.

Keywords :Radiation Pressure OF Laser, proton, high power lasers, laser plasma accelerators

Email: vosough_phn@yahoo.com

۱. مقدمه

همزمان با کشف روش تقویت پالسهای لیزری، پیشرفت چشمگیری در توسعه تکنولوژی لیزری در چند دهه اخیر صورت گرفته است. در این راستا، شتابدهنده های ذرات باردار که بر مبنای اندرکنش های لیزر با پلاسما طراحی شده اند، به دلیل ویژگیهای منحصر بفردی همچون گرادیان شتابدهی بالا، قله انرژی بالا و از همه مهمتر ابعاد به مراتب کوچکتر آنها در مقایسه با شتابدهنده های نسل قدیم، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده اند. باریکه یونهای تولید شده توسط این شتابدهنده های مینیاتوری به دلیل کیفیت بالایی که دارند کاربردهای متفاوتی خواهد داشت که به عنوان نمونه میتوان به درمان سرطان به روش یون درمانی [۱]، تصویربرداری پروتونی [۲] و همچنین آموزش سریع [۳] در بحث تولید منابع انرژی جدید اشاره کرد. یونهای پرانرژی را می توان توسط اندرکنش پالسهای لیزر پرتوان و فوق کوتاه با یک هدف نازک بدست آورد. مکانیزمهای شتابدهی متفاوتی در این زمینه معرفی شده اند که برخی از آنها عبارتند از: شتابدهی توسط میدان عمود بر سطح هدف (TNSA) [۴]، شتابدهی به واسطه انفجار کولونی یونها [۵]، شتابدهی توسط شوک میدان الکتریکی [۶] و شتابدهی بوسیله فشار تابش لیزر [۷]. هنگامیکه پالس لیزر با قطبش خطی بر روی هدف جامد متمرکز شود، الکترونیهای هدف در ناحیه تمرکز باریکه لیزر توسط بخش نوسانی نیروی اثرگذار لیزر گرم میشوند و از ناحیه اندرکنش تخلیه خواهند شد. بواسطه این رفتار الکترونها یک جدایی بار در داخل هدف رخ میدهد که سبب ایجاد یک میدان الکتریکی بر سطح هدف خواهد شد. این میدان به قدری قوی است که میتواند با یونیزه کردن اتمهای سطح هدف باعث شدن آنها و شتابدهی تا محدوده انرژی چندین مگا الکترون ولت شود. با اینحال مواردی همچون بازده پائین انرژی و تولید ذراتی با پخش شدگی انرژی زیاد، پتانسیل کاربردی این روش را در عمل محدود ساخته است. خوشبختانه در مورد پالسهای لیزری با قطبش دایروی، به دلیل حذف جمله نوسانی نیروی اثرگذار پالس لیزر گرمایش الکترونی ناچیز خواهد بود و مولفه طولی نیروی اثرگذار الکترونها را در جهت حرکت پالس لیزر پارو خواهد کرد. در نتیجه این عمل، که به شتابدهی فشار تابشی لیزر معروف است، الکترونها در جلوی پالس لیزر متراکم خواهند شد و یک میدان جدایی بار بسیار قوی در پشت لیزر ایجاد خواهد شد که باعث شتابدهی یونها و انتقال انرژی به آنها خواهد شد. مطالعات شبیه سازی و مدلهای تحلیلی بسیاری نشان داده اند که در این روش یونهایی با کیفیت انرژی بسیار بالا به شرط انتخاب پارامترهای لیزر و هدف مناسب تولید خواهد شد. در این مقاله به نقش ترکیب یونهای سازنده هدف اندرکنش در کیفیت انرژی یونهای تولید شده پرداخته شده است و برای این منظور

یک سری شبیه سازیهای دوبعدی انجام شده است که در آن هدف متشکل از یونهای کربن و پروتون با سه نسبت چگالی $n = \frac{n_H}{n_C}$

متفاوت و به مقادیر ۰/۱ و ۱۲ انتخاب شده است. هدف اصلی در این مطالعات بررسی تاثیر چگالی پروتون بر کنترل نیروی کولومبی یونهای کربن و در نتیجه تاثیر آن بر طیف انرژی پروتونهای خروجی است.

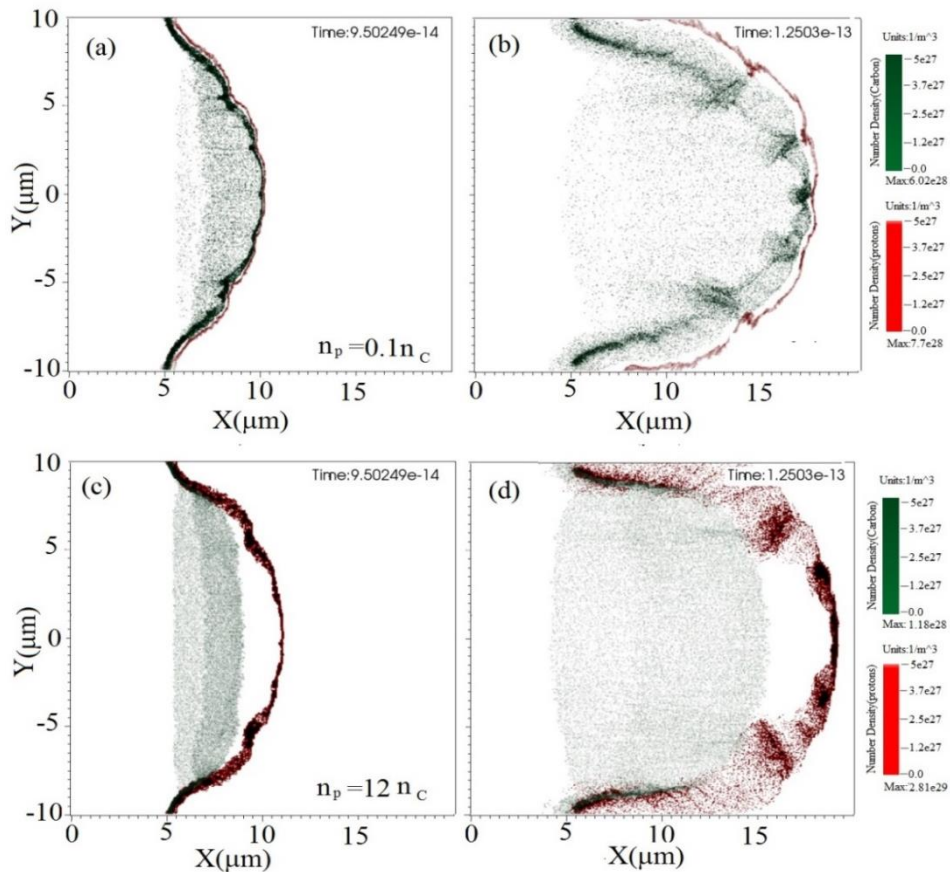
۲. روش کار

شبیه سازیهای صورت گرفته در کار حاضر بوسیله کد محاسباتی دوبعدی ذره جعبه (EPOCH) انجام شده است و در آنها پالس لیزر با طول موج $\lambda = 1 \mu m$ و دوره تناوب $T = 3.33 fs$ در نظر گرفته شده است که دارای قطبش دایروی است و نمایه فضایی آن بصورت گوسین و دامنه بدون بعد لیزر به صورت $a_L = a \cdot \exp(-y^2/\delta_L^2)$ تعریف شده است. در این رابطه دامنه بدو بعد شدت لیزر $a = eE/m_e \omega c = 100$ و اندازه شعاع لکه باریکه لیزر $\delta_L = 8 \lambda$ انتخاب شده است. شبکه محاسباتی دارای ابعاد $60 \lambda \times 32 \lambda$ است که متناظر با یک شبکه با تعداد سلولهایی به صورت 6000×800 خواهد بود که توسط ۲۰ ماکرو ذره اشغال شده است. هدف اندرکنش بصورت یک نمونه مرکب از یونهای کربن کاملاً یونیزه شده (C^{+6}) و هیدروژن (H^+) تعریف شده است که چگالی الکترونیهای هدف مقدار $n_e = 320 n_c$ را به خود اختصاص داده اند که رابطه آن با چگالی یونهای کربن و هیدروژن بصورت $320 n_e = n_H + 6 n_C$ می باشد. به منظور بررسی اثر نسبت چگالی هدف، شتابدهی پروتونهای به ازای نسب چگالی یونهای هیدروژن به یونهای کربن ($n = n_H/n_C$) در دو مقدار $n = 0/1$ و $n = 12$ شبیه سازی شده است. به منظور شتابدهی موثر به روش فشار تابش، ضخامت بهینه هدف نیز معادل $l = 0/1 \mu m$

انتخاب شده است که متناظر با بهینه چگالی جرمی سطحی هدف می‌باشد. پالس لیزر با شدت $I = 2.76 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ از سمت چپ وارد محیط شبیه سازی می‌شود و با هدف اندرکنش که در موقعیت $x = 5 \mu\text{m}$ و $x = 5/\mu\text{m}$ تعبیه شده است برخورد می‌کند. شرایط مرزی جاذب برای هردو ذرات و میدانهای الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده است تا مانع بازگشت ذرات و امواج برخوردی به قلمرو شبیه سازی شوند.

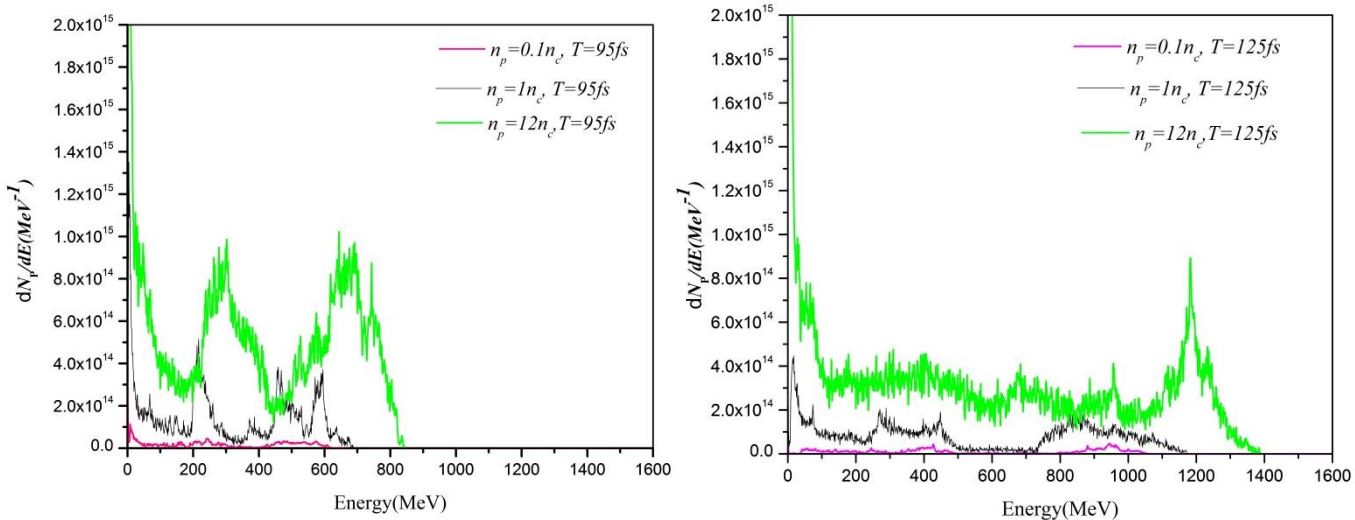
۳. نتایج شبیه سازی و تحلیل های فیزیکی:

تحولات زمانی چگالی پروتون ها و کربن های هدف مرکب برای نسبت چگالی $n = 0/1$ و $n = 12$ ، در شکل ۱ نشان داده شده است. در مراحل اولیه ($t = 95 \text{ fs}$)، تعادل بین نیروی فشار تابش لیزر بر الکترونها از یکسو و نیروی جاذبه میدان جدایی بار ایجاد شده بر الکترونها از سوی دیگر سبب تشکیل ساختار دولایه الکترون و یون در مکانیزم شتابدهی خواهد شد (شکلهای (۱a) و (۱c)). پروتونها به دلیل نسبت بار به جرم بیشتر بسیار سریعتر از یونهای کربن شتاب خواهند گرفت و در همان مراحل اولیه لایه پروتونهای متراکم شده از لایه یونهای کربن جدا خواهند شد.



شکل (۱): تحولات زمانی پروتونها (لایه قرمز رنگ) و کربنها (لایه سبز رنگ) در اثر اندرکنش پالس لیزر دایروی پر شدت با هدف مرکب. شکلهای (۱a) و (۱b) تحولات چگالی یونهای مرکب را در نسبت چگالی $n = 0/1$ به ترتیب در دو زمان $t = 95 \text{ fs}$ و $t = 125 \text{ fs}$ نشان میدهد و در شکلهای (۱c) و (۱d) همان نتایج برای نسبت چگالی $n = 12$ ارائه شده است.

در نسبت چگالی $n = 0/1$ ، به دلیل چگالی کم پروتونها، حضور لایه پروتونی در فرآیند شتابدهی یونهای کربن تاثیر گذار نخواهد بود و کل هدف توسط فشار تابش انرژی می‌گیرد و یونهای کربن و پروتون میدان جدایی بار یکسانی از نظر اندازه و شدت میدان مشاهده می‌کنند. در واقع با گذشت زمان ضخامت لایه پروتونهای شتاب گرفته شده و نیز ضخامت لایه کربنهای شتاب گرفته شده بدون تغییر باقی خواهد ماند. با افزایش چگالی پروتونها، شرایط بکلی دگرگون خواهد شد بطوریکه در نسبت چگالی $n = 12$ ، ضخامت لایه پروتونها شروع به پهن شدن میکند و بطور همزمان یونهای کربن نیز شکل متراکم خود را از دست میدهند و کاملا در فضا گستره میشوند (شکلهای (۱c) و (۱d)). این رفتار در واقع به دلیل غالب شدن نیروی کولومبی ناشی از یونهای کربن به نیروی فشار تابش لیزر بر الکترونها خواهد بود. در واقع زمانی که چگالی پروتونها افزایش می‌یابد، لایه پروتونها که در جلوی یونهای کربن حرکت میکند نقش یک حفاظ الکتروستاتیکی را ایفا میکند که سبب کاهش اثر میدان جدایی بار بر یونهای کربن هدف خواهد شد. در این شرایط در ناحیه یونهای کربن ابری از بارهای مثبت تشکیل خواهند شد که از یک سوی پروتونها را به سمت جلو دفع میکند و از سوی دیگر با اعمال یک نیروی جاذبه مانع شتابدهی الکترونها توسط نیروی فشار تابش لیزر خواهد شد. این اثر سبب پخش شدگی لایه الکترونی و متعاقب آن پهن شدگی ضخامت لایه پروتونی خواهد شد که در شکل (۱d) به وضوح قابل مشاهده است. اثر نیروی کولومبی ایر یونی تشکیل شده همچنین در طیف انرژی پروتونها کاملا مشهود است. در شکل ۲ طیف انرژی پروتونهای هدف به ازای نسبت چگالیهای متفاوت پروتون به کربن رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای نسبت چگالی پروتونهای بیشتر، انرژی قطع پروتونها و نیز میزان پخش شدگی انرژی افزایش می‌یابد که دلیل روشنی بر اعمال یک نیروی دافعه کولومبی بر پروتونها از سوی ایریونی است که سبب انتقال انرژی بیشتر به پروتونها حین فرآیند شتابدهی می‌شود.



شکل (۲): توزیع انرژی پروتونهای شتاب داده شده در نتیجه اندرکنش پالس لیزر با هدف. شکل چپ توزیع انرژی را برای سه نسبت چگالی در زمان ۹۵ فمتوثانیه نشان میدهد و شکل سمت راست همان نتایج را در زمان ۱۲۵ فمتو ثانیه ارائه میدهد.



۴. نتیجه‌گیری

مشاهدات بدست آمده در کار حاضر نشان داده است که نسبت چگالی یونهای یک هدف مرکب نقش بسیار مهمی در کنترل انرژی ذرات تولید شده خواهد داشت. در واقع در یک هدف متشکل از مخلوطی از یونهای کربن و هیدروژن، در اندرکنش لیزر پرتوان با هدفهایی با نسبت چگالی کم یونهای هیدروژن، پروتونهایی با طیف انرژی شبه تک انرژی تولید می‌شود و این درحالیست که با افزایش چگالی یونهای هیدروژن در هدف، طیف انرژی پروتونهای تولید شده به سمت انرژی‌های بالاتر و با پخش شدگی انرژی بیشتر متمایل خواهد شد.

مراجع

- [1] S.V.Bulanov, T.z.Esirkepov, V.S.Khoroshkov, A.V.Kuznetsov, and F.Pegoraro, Phys.Lett.A 299240(2002)
- [2] M.Bprghesi, D.H Campbell, phys.plasma 9,2214(2002)
- [3] T.Ditmire, Nature 398,489(1999)
- [4] Y.Y.Ma, Z.M.Sheng, Phys.Plasma 16034502(2009)
- [5] E.Fourkal, I.Velchev, Phys.Rev.E 71,036412(2005)
- [6] Li, Yin, J.Albright, Laser Part Beams 24,291(2006)
- [7] A.P.L.Robinson, M.Zepf, New J.Physics.10,013021(2008).