

دانشگاه مازندران ۲۳ و ۲۶ تیرماه ۱٤۰۰

انجمن علوم و . .

مطالعه اثر یونیزاسیون در مکانیسم شتابدهی TNSA

محمدجعفر جعفری ۱ ؛ سمیه رضائی 🐄

۱ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای خیابان کارگر شمالی ، تهران <u>Jafari_mjafar@yahoo.com</u>

۲ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، انتهای خیابان کارگر شمالی ، تهران <u>Somayeh.rezaei@gmail.com</u>

کلید واژه: شبیه سازی دو بعدی ذره ای، شتابدهی لیزری پروتون، TNSAمکانیزم شتابدهی غلافی، یونیزاسیون هدف

چکیدہ

مکانیزم شتابدهی غلافی پروتون (TNSA) یکی از رایج ترین مکانیزمهای شتابدهی پروتون در چیدمانهای تجربی می باشد. در این پژوهش با استفاده از شبیه سازی های دو بعدی ذره ای به مطالعه اثر یونیز اسیون در عملکرد شتابدهی پروتون پرداخته شده است. برای این منظور دو هدف جامد (خنثی) و نیز پلاسمای کاملاً یونیزه از جنس آلومینیوم با صخامت ۰/۰ میکرومتر که با یک لایه نازک هیدروژن با ضخامت ۰۰ نانومتر جفت شده است در نظر گرفته شده اند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد برای شدتهای متوسط لیزری (در اینجا ۱۰=۵۵) استفاده از ساختار جامد منجر به افزایش انرژی بیشینه پروتون ها حدود ۳۱ درصد نسبت به حالت هدف با ساختار پلاسما می شود

Study of field ionization effect on the TNSA proton acceleration mechanism

Mohammad Jafar Jafari¹, Somayeh Rezaei^{1*}

Plasma and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. BOX:14395-836,Tehran, Iran *corresponding e-mail: Somayeh.rezaei@gmail.com

Abstract

Target normal sheath acceleration mechanism (TNSA) is one of the most common proton acceleration mechanisms in experimental arrangements. In this research, the effect of ionization on the proton energy performance has been studied using two-dimensional particle simulations. For this purpose, two solid (neutral) and fully ionized plasma Al targets with a thickness of 0.5 μ m paired with a thin layer of hydrogen at thickness of 50 nm are considered. The simulation results show that for medium laser intensities (here a0= 10) the use of solid structure leads to an increase in the maximum energy of the protons by about 36% compared to the preplasma target.

Keywords: Laser proton acceleration, Solid target ionization, TNSA mechanism, 2D particle in cell simulation

هشتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک یلاسما (PEP2021)



دانشگاه مازندران ۲۳ و ۲٤ تیرماه ۱٤۰۰

انجمن علوم و مهندسی پلاسمای ایران

مقدمه

يونيزاسيون ميدانى

یونیزاسیون میدانی فرآیندی است که از اهمیت ویژهای برای تعامل ليزر و پلاسما در رژيم با شدت بسيار بالا برخوردار است. و اين امر می تواند بر تولید الکترون های پر شتاب و نیز شتاب یونی ناشی از تابش هدف جامد توسط ليزر فوق العاده شديد تأثير بگذارد. اين فرآیند درکد Smilei [۸] به صورت یک ماژول مونت کارلو تعبیه شده است. در توضیح یونیزاسیون تونل زنی باید گفت که الکترون در داخل چاه پتانسیل اتمی غیراختلالی و بر روی سطح انرژی Ip قرار میگیرد. با توجه به اینکه فرکانس گذار اتمی بسیار کمتر از فركانس ليزر است ميدان الكتريكي ليزر به طور معمول ثابت ميماند. میدان لیزر اعمالی پتانسیل اتمی چاہ را از شکل طبیعی خارج کردہ و سد پتانسیلی که الکترون در اتم یا یون می بیند را پایین می آورد. در نتيجه الكترون از ساختار اتمى خارج مىشود. وقتى ميدان به اندازه کافی قوی باشد، سد پتانسیل زیر سطح اننرژی الکترون قرار گرفته و الکترون را آزاد میکند. در شرایطی که افت سد پتانسیل كولني انكان يذير نباشد براي آزاد كردن الكترون احتمال تونل زني كوانتومي وجود دارد. اين فرآيند يونيزاسيون تونل زني ناميده مى شود[٩].

شبیه سازی و نتایج

به منظور بررسی اثر یونیزاسیون در عملکرد شتابدهی پروتون، شبیهسازی ها با استفاده از نسخه دو بعدی کد اسمایل انجام شده است. پالس لیزر با قطبش P و با تابش عمود بر سطح هدف بر دو هدف پلاسما و هدف جامد به طور جداگانه تابیده میشود. هدف از دو لایه فویل آلومینویم (با ضخامت ٥/ میکرومتر) و یک لایه نازک هیدروژن (با ضخامت ٥٠ نانومتر) تشکیل شده است. در حالت نازک هیدروژن (با ضخامت ٥٠ نانومتر) تشکیل شده است. در حالت هدف جامد، عامل یونیزاسیون میدانی در کد فعال شده و در حالت هدف پلاسمایی، لایه آلمینیومی به صورت ⁹⁺AI و هیدروژن به صورت کاملاً یونیزه در نظر گرفته میشود. پالس لیزر با طول موج ۲۰۸ نانومتر و با پروفایل زمانی ² sin و مکانی گوسی با ۲۰۶۶ FWHM و پهنای باریکه ۳ میکرومتردر راستای X منتشر میشود. پارامتر بدون بعد شدت لیزر برابر ۱۰ =۵۵ میباشد. جعبه شبیهسازی شتاب یونی تا انرژی نزدیک به صدها مگا الکترون ولت از طریق پالس لیزر، موضوعی است که علاقه دانشمندان در حوزههای فناوری، صنعتی و پزشکی را به خود جلب کرده است[۱, ۲]. چندین گروه تحقیقاتی در زمینه پلاسماهای ناشی از لیزر، تلاشهای زیادی انجام دادهاند. این تحقیقات با تعداد زیادی از برنامههای امیدوار کننده و چشمگیر، مانند شتاب دهندههای لیزر پلاسما، واکنشهای هستهای حاصل از پلاسما تولید شده توسط لیزر، درمانهای پزشکی با استفاده از ذرات باردار شتاب داده شده توسط پالسهای لیزر بسیار کوتاه و غیره، مرتبط است.

الکترونهای ساطع شده از سطح پشتی هدف، یک میدان الكترواستاتيك بسيار شديد بين أنها و هدف داراي بار مثبت توليد میکنند که این میدان یونها را در جهت جلو شتاب میدهد. این میدان الکترواستاتیک با چگالی الکترونهای داغ ساطع شده توسط هدف و دمای آنها متناسب است[۳]. بنابراین، الکترونها نقش میانجی بین لیزر خارجی و شتاب یونها را بازی میکنند. گزارشات و مقالات بسیاری از دادههای تجربی از بررسی روش شتابدهی از غلاف پشتی هدف با ضخامتهای مختلف و نیز پالس لیزری با شدتهای متوسط (^۲- ۱۰^{۱۹} wcm) و بالا (^۲- ۱۰^{۲۱}) در دسترس است که در آنها به مطالعه پارامترهای لیزر و هدف پرداخته شده است[٤-٢]. با توجه به بالا بودن شدت ليزري و در نتيجه يونيزه شدن هدف در همان لحظات اوليه برهم كنش تصور كلي بر اين بوده است که وارد کردن عامل یونیزاسیون تاثیری در نتایج نهایی مطالعات شبیه سازی ندارد. این در حالی است که، یونیزاسیون به طور مستقیم موجب تغيير پروفايل چگالي و نيز تابع توزيع اوليه ذرات مي شود و در نتیجه می تواند در عملکرد شتابدهی پرو تون تاثیر گذار باشد. اخیراً تاثیر فعال کردن عامل یونش در نتایج شبیه سازی گرمایش الکترون ها مطاله و بررسی شده است[۷]. در کار حاضر با استفاده از ابزار شبیه سازی ذرهای و با فعال کردن یونیزاسیون بر پایه یونش میدانی در معادلات، نتایج حاصل از انرژی پروتونها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

انجمن علوم و مهندسی پلاسمای ایران



با اندازه ۱۰۰ در ۲۰ میکرومتر و طول هر سلول ۰۰/۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. چگالی الکترونها در هر دو حالت ۸۰ د چگالی الکترونی و یونی هیدروژن در هر دو حالت ۹ در نظر گرفته شده است. شکل ۱، طیف انرژی هیدورژن (پروتون) در دو حالت هدف جامد و هدف پلاسمایی در زمان fs ۲۰۰ را نشان میدهد. همان گونه که از شکل ۱ مشاهده می شود انرژی بیشینه پروتونی در حالتی که هدف به صورت جامد به کار گرفته شده و بیشتر از انرژی بیشینه در حالتی است که هدف به صورت پلاسمای کاملاً یونیزه به کار گرفته شده است. از آنجا که چگالی الکترونی و تابع توزیع انها به عنوان نقش میانجی در گرفتن انرژی از لیزر و چگالی الکترونی جستجو کرد.



شکل ۱ : تابع توزیع انرژی پروتون در برهم کنش پالس با شدت ۱۰ =a با هدف فویل جامد و یونیزه آلومینیومی.

شکل ۲، پروفایل دو بعدی و شکل ۳، پروفایل یک بعدی چگالی الکترونی هدف الومینیوم برای دو حالت کاملاً یونیزه و حالتی که هدف جامد به تدریج یونیزه شده و چگالی الکترونی افزایش می یابد را اندکی پس از برخورد پالس به هدف نشان میدهد. همان گونه که از شکل ۳ مشاهده میشود، پالس لیزری در حالتی که هدف به صورت کاملاً یونیزه میباشد با چگالی nc ۸۰ مواجه شده است، در حالی که در حالت هدف جامد، با ورود لیزر به آرامی هدف یونیزه شده و چگالی الکترونی از صفر به تدریج افزایش مییابد.

کاملاً یونیزه اندکی بیشتر می شود. در نتیجه میزان جذب انرژی لیزر و به تبع آن دامنه میدان غلافی تشکیل شده نیز بیشتر شده و در نهایت منجر به شتابدهی بیشتر پروتون ها می شود.



شکل ۲: پروفایل دو بعدی چگالی الکترونی در الف) هدف جامد آلومینیومی و ب) هدف یونیزه شده آلومینیومی بعد از رسیدن لیزر به هدف.



و هدف یونیزه شده آلومینیومی بعد از رسیدن پالس لیزر به هدف. و

هشتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما (PEP2021)



دانشگاه مازندران ۲۳ و ۲٤ تیرماه ۱٤۰۰

مرجع ها

. Radziemski LJ. Lasers-induced plasmas and applications: CRC Press; 2020.

.^Y Kawata S, Izumiyama T, Nagashima T, Takano M, Barada D, Kong Q, et al. Laser ion acceleration toward future ion beam cancer therapy-Numerical simulation study. Laser therapy, 22(2013) 103

.⁷ Jäckel O, Polz J, Pfotenhauer S, Schlenvoigt H, Schwoerer H, Kaluza M. Alloptical measurement of the hot electron sheath driving laser ion acceleration from thin foils. New Journal of Physics. 2010;12, 103027.

.⁶ Neely D, Foster P ,Robinson A, Lindau F, Lundh O, Persson A, et al. Enhanced proton beams from ultrathin targets driven by high contrast laser pulses. Applied Physics Letters. 2006;89, 021502.

.[△] Margarone D, Klimo O, Kim I, Prokůpek J, Limpouch J, Jeong T, et al. Laser-driven proton acceleration enhancement by nanostructured foils. Physical review letters. 2012;109, 234801.

.⁷ Dollar F, Zulick C, Matsuoka T, McGuffey C, Bulanov S, Chvykov V, et al. High contrast ion acceleration at intensities exceeding 10²¹Wcm⁻² Physics of Plasmas. 2013;20, 056703.

 $.^{V}$ Khalilzadeh E, Jafari M, Rezaei S, Dehghani Z. The effect of the laser pulse shape on the wakefield generation in field-ionized plasma. Chinese Journal of Physics. 2021;71:212-23.

.[∧] Derouillat J, Beck A, Pérez F, Vinci T, Chiaramello M, Grassi A, et al. Smilei: A collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation. Computer Physics Communications. 2018;222:351-73.

.⁹ Ammosov MV. Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field. Sov Phys JETP. 1987;64:1191.

در این حالت مکان عرضی در نقطه مرکزی ثابت در نظر گرفته شده است. به علاوه برای بررسی دقیق تر این مسئله پروفایل میدان الکتریکی لیزر پس از ورود به هدف در شکل ٤ رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، پالس لیزر در هر دو حالت روی هم افتاد اما رفتار میدان در هدف که در نمودار به صورت ناحیه جداگانه و با بزرگ نمایی نشان داده شده است، مؤید این مطلب است که با در نظر گرفتن عامل یونیزاسیون در محاسبات، پالس لیزری نفوذ بیشتری در هدف دارد و در نتیجه بازدهی جذب لیزری نیز در این حالت بیشتر میباشد.



شکل٤ : رفتار میدان الکتریکی عرضی لیزر در طول جعبه شبیه سازی در دو حالت فویل جامد آلومینیومی و نیز فویل یونیزه شده آلومینیومی. ناحیه داخل هدف به صورت جداگانه و با بزرگ نمایی در شکل مشخص است.

نتيجه گيرى

در این پژوهش نقش عامل یونیزاسیون میدانی در عملکرد شتابدهی پروتون در رهیافت TNSA مطالعه و شبیه سازی شده است. شبیهسازیهای انجام شده با کد نسبیتی و الکترومغناطیسی اسمایل نشان میدهد با فعال کردن عامل یونش، پروفایل چگالی الکترونی در حالت فویل جامد از حالت پله ای به حالت تغییرات با شیب ملایم تغییر کرده و در نتیجه میدان نسبت به حالتی که پروفایل پله ای (در حالت کاملا یونیزه) بیشتر نفوذ میکند. به همین ترتیب با نفوذ بیشتر میدان لیزری الکترون ها انرژی بیشتری کسب کرده و در نتیجه میدان شتابدهی یونی قوی تر و در نهایت انرژی قطع پروتون ها در این حالت بیشتر از حالتی است که هدف به صورت کاملا پلاسما در نظر گرفته شود.