

مجله علوم و فنون هستهای، جلد ۹۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 91, No 1, 2020

تأثیر اندازه قطر نانوذرات هدف در شتابدهی لیزری پروتون در رهیافت TNSA

محمد جعفر جعفرى ، الناز يزدانى ، سميه رضايى * ا

۱. پژوهشکدهی پلاسما و گداخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳–۱۴۳۹۹، تهران-ایران ۲. گروه فیزیک، دانشکدهی علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۱۷۵–۱۴۱۱۵، تهران ـ ایران

مقالەي پژوھشى

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۱۱

چکیدہ

یکی از رایجترین روشهای شتابدهی پروتون، روش شتابدهی از غلاف پشت هدف (TNSA) میباشد. استفاده از یک لایه فوم در جلوی هدف اصلی نقش به سزایی در میزان جذب انرژی لیزر توسط الکترونها و به تبع آن شتابدهی پروتون ایفا میکند. این لایه میتواند با چگالی یکنواخت و همگن و یا با چگالی موضعی در یک ساختار نانو باشد. در این پژوهش با فرض به کارگیری لایه فوم با ساختار نانو و با استفاده از شبیه سازی های دو بعدی ذرمای، به مطالعه اثر اندازه نانوذرات پیش لایه در انرژی نهایی پروتون پرداخته میشود. ذرات با شعاعهای ۱۰، ۶۰ و شبیه سازی های دو بعدی ذرمای، به مطالعه اثر اندازه نانوذرات پیش لایه در انرژی نهایی پروتون پرداخته میشود. ذرات با شعاعهای ۱۰، ۶۰ و شبیه سازی های دو بند با اندازه های تصادفی در بازه ۱۰ تا ۱۰ نانومتر در هدف با لایه فومی در دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ میکرومتر و با چگالی میانگین نزدیک بحرانی در شدت لیزری ۱۰ = a (معادل^۲ W/cm¹) مطالعه و شبیه سازی شدهاند. مطابق با نتایج به دست آمده در هدف با ضخامت ۱۰ میکرومتر اختلاف بیشینه انرژی جمعیت الکترونی و در نتیجه پروتونها ناچیز و قابل صرفنظر کردن است. هر چند با افزایش ضخامت هدف، تغییر اندازه شعاع نانوذرات تأثیر قابل توجهی در انرژی نهایی طیف پروتون می گذارد. به طوری که با کوچک کردن اندازه شعاع نانوذرات از ۱۰ نانومتر از ۱۰ نانومتر در همینه انرژی پروتون می گذارد. به طوری که با کوچک کردن

كليدواژهها: شتابدهي پروتون، TNSA، نانوساختار، اندازه نانوذرات، چگالي نزديک بحراني

Target Nano-particles size effect on the laser proton acceleration in the TNSA mechanism

M.J. Jafari¹, E. Yazdani², S. Rezaei^{*1}

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran
 Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-175, Tehran - Iran

Abstract

One of the most common laser proton acceleration mechanism is Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) method. The use of a foam layer in front of the main target plays an important role in the amount of laser energy absorption by the electrons and consequently the acceleration of the proton. The front layer can be either uniform and homogeneous or nano-structured. In this study, by assuming a nanostructured foam layer, and using two-dimensional particle simulations code, the effect of nanoparticle's radius on the proton cut-off energy is investigated. Particles with radii of 10, 60 and 120 nm and random sizes in the range of 10 to 120 nm have been studied and simulated in a front layer with thickness of 10 and 20 µm with near-critical average density at laser intensity a = 10 (I \approx 10²⁰W/cm²). According to the results, in the case of thin foam layer, the differences of electron and consequently proton spectra are negligible. However, by increasing the foam thickness, the influence of nanoparticle radius causes a further dissociation in the final proton energy spectra. So that, the proton energy increases almost 45% by reducing the nanoparticle size from 120 nm to 10 nm.

Keywords: TNSA, Laser proton acceleration, Nano-structured target, Nano particle size

*Email: Somayeh.rezaei@gmail.com

۱. مقدمه

از زمان اختراع فن أورى ليزر در سال ۱۹۶۰ برهم كنش پالس لیزری با ماده مورد توجه بسیاری قرار گرفته و مطالعات بسیاری در این راستا برای کاربردهای فنی و علمی انجام شده است. رژیم برهمکنشی به ویژگیهای پالس لیزری (نظیر طول موج، طول پالس، انرژی، اندازه لکه و شدت آن) و نیز مشخصههای ماده مورد تابش (مثل نوع ماده، چگالی و ضخامت آن) بستگی دارد. توسعه فن آوری لیزرهایی با شدت و انرژی بالا در دهههای اخیر، منجر به رژیم برهم کنشی جدیدی از لیزر با ماده شده است که شتابدهی ذرات را به دنبال دارد. بهطور کلی علاوه بر بررسی فیزیک پایهای این پدیده، از نظر کاربردی کم حجم بودن شتابدهندههای لیزری مطلوب و مقرون بهصرفه است و جایگزین مناسبی برای شتابدهندههای حجیم و گران معمولی است. اصول شتابدهی ذرات باردار در محیط پلاسما اولین بار توسط وکسلر^۱ در سال ۱۹۵۷ پیشنهاد شده است [1]. در سال ۲۰۰۰ گسیل شدت بالای پروتون با انرژی چندین مگا الکترون ولت در آزمایشهای برهم کنش لیزر با هدف جامد نازک مشاهده شد [۲]. بلافاصله پس از آن تحقیقات روی مطالعه فیزیک این پدیده و کاربردهای ممکن آن پیش رفت. باریکههای یونی تولید شده با توجه به استفاده آن در کابردهای مختلف، نیاز به مشخصههای خاصی از طیف دارند. به همین دلیل تحقیقات در این حوزه همچنان در حال انجام است [۳-۴].

سازوکار شتابدهی پروتون نسبت به الکترون بهعلت تغییر جرم زیاد آنها متفاوت است. در رهیافت شتاب الکترون پالس لیزری با یک محیط گازی برهمکنش کرده که یک محیط پلاسمایی با چگالی کم تولید شده و لیزر میتواند مسافت زیادی را در آن انتشار یابد. در حالی که برای شتاب پروتون، تابش بر روی فویل جامد نازکی است که یک پلاسما با چگالی نزدیک جامد تولید میکند. یکی از ویژگیهای منحصر به فرد یونهایی با انرژی چندین مگا الکترون ولت این است که ضمن ترابرد در ماده چگال، بیشتر انرژی خود را در انتهای مسیر برجای میگذارند. در حالی که برای باریکه ایکس و گاما و نیز

باریکه الکترونی این گونه نمی باشد. این نوع جایگذرای موضعی انرژی در کاربردهایی مثل هادرون تراپی مفید است.

در حال حاضر امکان تولید باریکه الکترونی با انرژی ۴٬۵ گیگا الکترون ولت در مسافت چندین سانتیمتر [۵] و پروتون تا انرژی ۸۵ مگاالکترونولت در مسافت چندین میکرومتر [۶] گزارش شده است. هرچند بهمنظور بهرهبردن از این باریکهها بايستى كيفيت باريكه بهبود داده شود. تاكنون تحقيقات زيادى با هدف بهبود ویژگیهایی مثل افزایش تعداد ذرات شتاب گرفته، پیکربندی تجربی سادهتر همراه با قابلیت کنترل و تکرارپذیری بالا، صورت گرفته است. روش رایج برای شتاب پروتونها، سازوکار شتابدهی در اثر تشکیل غلاف از سطح عمود بر پشت هدف^۲ میباشد [۷]. در این رهیافت، ابتدا بسیاری از الکترونها بهدلیل اینرسی کمتر نسبت به یونها در اثر تابش لیزر با مرتبه شدت حدود ۱۰^{۲۱} Wcm^{-۲} از سمت جلوی هدف از طریق جذب غیربرخوردی انرژی کسب کرده و این الکترونهای داغ یا سریع از پشت هدف فرار کرده و ابر الكترونى با شعاع طول دى باى تشكيل مى شود. جدايى بار ايجاد شده منجر به توليد ميدان الكتريكي غلافي طولي مي شود که به فاصله چند میکرون کاهش می یابد. این میدان می تواند باعث شتاب یون ها در جهت عمود بر هدف شود. در این سازوکار پروتونهای ناشی از ناخالصیهای پشت هدف تا چندین مگاالکترونولت انرژی کسب میکنند. میدان غلافی مي تواند با افزايش دما و يا چگالي الكترون ها افزايش يابد، بنابراین شتابدهی در اثر تشکیل غلاف از سطح عمود بر پشت هدف را میتوان با تنظیم مناسب پارامترهای هدف بهبود بخشید. 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 (۱۰^{۱۹} Wcm^{-۲}) و بالا (۱۰^{۱۹} Wcm^{-۲}) در دسترس است که در آنها به مطالعه پارامترهای لیزر و هدف پرداخته شده است [۸-۸]. مارگارون و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۲ شتاب پروتونها را از طریق هدفهای پلیاسترین با سطوح شکل داده شده بهصورت تجربی و شبیهسازی آنالیز و بررسی کردند. این گروه سطح هدف را بهصورت نانوکرههایی در چیدمان منظم و

^{2.} Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)

^{1.} Veksler

پیوسته از جنس خود پلی استرین و با همان چگالی در نظر گرفته و بیشینه انرژی پروتونی را برای نانو کرههای با اندازه شعاع مختلف حدود ۱۰ مگاالکترونولت به دست آورده اند [۹]. در حال حاضر، سازو کار شتاب دهی از غلاف تشکیل شده از پشت هدف با تولید طیف وسیعی از انرژی پروتون و گسیل آن با درخشندگی کم برای کاربردهای مهم و خاص مثل رادیو گرافی پروتونی مناسب است [۱۱].

ایده اصلی برای افزایش بازدهی در تولید الکترونهای نسبیتی در فرایند شتابدهی از پشت غلاف، استفاده از پلاسمایی با چگالی نزدیک بحرانی است که فوم نامیده می شود. در این مطالعات مشخص شده است که با استفاده از این پیکربندی هدف اگر مقادیر پارامترهای فوم (از قبیل چگالی و ضخامت) بهطور مناسبی برای پالس لیزری خاص طراحی شوند، بیشینه انرژی پروتون میتواند بهطور چشمگیری افزایش پیدا کند [۱۲]. هر چند چالشهای فراوانی در زمینه ساخت هدف با ویژگیهای مشخص وجود دارد، اما کدهای شبیهسازی ذرهای در دوبعد و سهبعد برای بررسی ابعاد مختلف هدف با پارمترهای متفاوت می توانند استفاده شود. مطالعه و شبیه سازی به کارگیری لایه های با چگالی همگن و ضخامت های مختلف و تأثیر آنها در شتابدهی پروتون در مرجع [۱۳] بررسی شده است. از نقطه نظر تجربی پلاسمایی با چگالی نزدیک بحرانی را می توان با موادی با ساختار نانو تولید کرد و این نوع طراحی هدف اخیراً در حوزه برهم کنش پالس لیزری با پلاسما مورد توجه قرار گرفته است [۱۴، ۱۵]. یکی از عوامل مهم، شکل و اندازه شعاع نانوذرات لایه فوم میباشد. در حالی که مطالعاتی در زمينه مقايسه لايه با چگالى يكنواخت و لايه با ساختار نانو انجام شده است [۱۴]، اما در این پژوهش، تمرکز اصلی بر استفاده از فومهایی با ساختار نانو در جلوی فویل آلومینیمی می باشد و هدف اصلی این پژوهش، بررسی اندازه قطر نانوذرات لایه فوم در میزان گرمایش جمعیت الکترونی و نیز انرژی نهایی پروتونها میباشد. برای این منظور نانوذرات در سه شعاع ۱۰، ۶۰ و ۱۲۰ نانومتری در هدف با دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ میکرومتری چیده شدهاند. به علاوه از آنجا که لایههای فومی در واقعیت شامل هنگردی از نانوذرات با قطرهای مختلف میباشند، یک هدف با ساختار نانو شامل کرههایی با اندازه شعاع متفاوت در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر نیز مطالعه شده است.

تغییر فرایند گرم شدن الکترونها و نیز انرژی پروتونها با تغییر اندازه شعاع نانوذرات و تأثیر ساختار لایه فوم در شتابدهی پروتون بررسی و تحلیل شده است. با استفاده از کد شبیهسازی دوبعد مکان و سهبعد سرعت ذره در جعبه، پارامترهای مربوط طیف انرژی الکترونها و پروتونها مورد بررسی قرار می گیرد. جهت انجام شبیهسازی از سیستمهای کامپیوتری با سرعت پردازش بالا استفاده خواهد شد.

۲. مشخصههای شبیهسازی

برای انجام شبیه سازی ها از کد ذره ای نسبیتی الکترومغناطیسی دوبعدی پیکانته استفاده شده است [۱۶]. هدف به کار رفته در این شبیه سازی ها شامل سه لایه با ضخامت های ۲۰ و یا ۱۰ میکرومتری (برای لایه کربنی) به عنوان پیش لایه در جلوی یک فویل فلزی و لایه آلومینیمی که به لایه نازک پروتونی (لایه هیدروژنی) از پشت جفت شده است می باشد (شکل ۱).

لایه کربنی (لایهای که لیزر به آن میتابد) در ساختار نانو؛ شامل نانوکرههایی با چگالی موضعی بالا میباشد که در مجموع با فضای خالی بین آنها چگالی این لایه کربنی بهطور میانگین n_c ۱ است که با فاکتور حجمی ۰٫۰۳۳ این چگالی بهطور موضعی حدود ۳۰ n میباشد. در این مقاله مختصات مرکز نانوکرهها از یک تابع تصادفی انتخاب میشوند و در تمامی شبیهسازیها چگالی لایه فوم ثابت و بهصورت میانگین، معادل چگالی بحرانی یلاسما در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. چیدمان لایههای کربنی، آلومینیمی و هیدروژنی در کد شبیهسازی.

لایه آلومینیمی و هیدروژنی به ترتیب با چگالی ۴۵n_c و ۸n_c میباشند. جعبه شبیهسازی در ابعاد ۶۰ در ۲۰ و قدرت تفکیک مکانی ۲۰٫۲ برابر طولموج لیزر است. لایه فومی با ضخامت ۱۰ و یا ۲۰ میکرومتر و ضخامت لایه آلومینیمی ۵٫۰ میکرومتر و لایه هیدروژنی ۶۰ نانومتر میباشد. در تمامی شبیهسازیها دو لایه فلزی و هیدروژنی ثابت و اثر تغییر ضخامت و اندازه شعاع نانوذرات پیش لایه فومی در انرژی نهایی پروتون بررسی شده است. در این کار ساختار نانو بهصورت هنگردی از نانوکرهها با شعاع ثابت (۱۰و یا ۶۰ و یا ۱۲۰نانومتر) در یک چیدمان تصادفی به کار گرفته شده است. شکل ۲، طرحوارهای از چیدمان لایه کربنی و نیز توزیع چگالی این لایه در لحظه صفر شبیهسازی را نشان می دهد.

بهعلاوه، برای بهدست آوردن نتایج نزدیک به واقعیت، حالت نانوکره با شعاعهای متغیر بین ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر نیز بررسی شده است. پالس لیزری با قطبش p و پروفایل زمانی 7 son، طولموج FWHM = ۱۵ λ/c ، $\lambda = \cdot_{\Lambda}$ µm و کمر باریکه ۵µm از سمت چپ بهصورت عمودی به هدف برخورد میکند. شدت لیزری در بازه ۱۰= $_{a}$ معادل با ^۲W/cm¹ ا

۳. بحث و نتايج

در این قسمت نتایج بهدست آمده حاصل از تغییرات پارامترهای مختلف و تأثیر آنها بر روی بیشینه انرژی پروتون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی ها برای اندازههای مختلف از نانوذرات با در نظر گرفتن شدت لیزری $1 = a_{\rm s}$ ، چگالی میانگین لایه فوم $n = n_{\rm c}$ و برای دو ضخامت $f_{\rm f} = 10 \, \mu m$

همان گونه که از شکل ۳ (الف) مشاهده می شود، برای هدف با ضخامت فوم $l_f = 1 \cdot \mu m$ مقدار انرژی نهایی پروتون تقریباً برای همه حالتها یکسان است و با تغییر اندازه شعاع نانوذرات تغییر قابل توجهی در طیف انرژی پروتون مشاهده نمی شود. هرچند ساختار شامل نانوذرات کوچکتر (منحنی سبز رنگ) بیش ترین مقدار انرژی را نشان می دهد.

با افزایش ضخامت لایه فوم در شکل ۳ (ب) مشاهده می شود اندازه نانوذرات تأثیر قابل توجهی در شتاب پروتون می تواند بگذارد. به طوری که با افزایش این اندازه از انرژی نهایی پروتون کاسته می شود. از آن جا که در حالتی که اندازه نانوذرات به صورت تصادفی تغییر می کند، میانگین مابین حالت ۱۲۰ و

۶۰ نانومتر میباشد، از اینرو میزان شتابدهی پروتون در این حالت نیز نزدیک به نتایج مربوط به حالت ۶۰ نانومتر میباشد.



شکل ۲. الف) طرحوارهای از چیدمان تصادفی نانوکرهها در لایه کربنی (ب) چیدمان لایه کربنی در لحظه صفر حاصل از کد شبیهسازی برای هدف با لایه ۱۰ میکرومتری.



شکل ۳. طیف انرژی باریکه پروتون در هدف با لایه فومی الف) ۱۰ میکرومتری و ب) ۲۰ میکرومتری. طیف مربوط به شعاعهای مختلف با رنگهای مختلف نشان داده شده است.

پالس لیزری در هدف با ضخامت کم $l_f = 1 \ \mu m$ نسبت هدف ضخیمتر $l_f = 7 \ \mu m$ مدت زمان کمتری حضور دارد. از اینرو ساختارهای متفاوت نانو در این ضخامت مجال اثرگذاری نداشته و نتایج تقریباً همپوشانی دارند. با بزرگتر شدن ضخامت هدف، وقتی نانوذرات با شعاع بزرگتر به کار گرفته میشود، پراکندگی پالس لیزری بیشتر بوده و در نهایت از میزان شدت لیزری که به فویل آلومینیمی می سد، کاسته میشود. به عبارتی، بازدهی جذب انرژی لیزر با پراکندگی آن کاهش مییابد. به علاوه، برای حالتی که نانوذرات با شعاعهای تصادفی در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر به کار گرفته شدهاند، با افزایش ضخامت این لایه میزان انرژی پروتون کاهش مییابد. و از آن جا که این حالت چیدمان هدف (با شعاع های متفاوت) به واقعیت نزدیکتر می باشد، در این حالت به کارگیری لایه فومی با ضخامت کمتر نتایج بهتری را به دنبال دارد.

از آنجا که پروتونها انرژی خود را از میدان الکتریکی بار فضای ایجاد شده توسط الکترونهای شتاب گرفته دریافت میکنند، لذا بهمنظور توضیح فیزیکی نمودارهای طیف انرژی الکترونها نیز درست در لحظهای که به فویل آلومینیمی میرسند، برای نانوذارت با شعاعهای مختلف در شکل ۴ رسم شده است.



شکل ۴. طیف انرژی باریکه الکترونی در هدف با لایه فومی الف) ۱۰ میکرومتری و ب) ۲۰ میکرومتری. طیف مربوط به شعاعهای مختلف با رنگهای مختلف نشان داده شده است.

همان گونه که از شکل ۴ (الف) مشخص است طیف الكتروني براي حالتهاي مختلف از نانوذرات با شعاعهاي مختلف تقريباً روى هم مىباشد. به عبارتى اثر تغيير اندازه نانو ذرات در هدفی با لایه فوم نسبتاً نازک $l_{
m f} = 1 \cdot \mu m$ ، بسیار ناچیز و قابل صرفنظر کردن می باشد. در حالی که الکترون ها در هدفی با لایه فوم نسبتاً ضخیم $l_{
m f}=$ ۲۰ μm و با ذراتی با اندازه $l_{
m f}$ کوچکتر ۱۰ نانومتر به انرژی حدود ۹۰ مگا الکترون ولت شتاب گرفته که حدود دو برابر انرژی الکترونها در حالت با شعاع ۱۲۰ نانومتر میباشد. بههمین ترتیب میدان بار فضای توليدشده توسط اين الكترونها بيشتر و در نتيجه شتابدهي پروتونها در چنین ساختاری مؤثرتر میباشد. همان گونه که از شکل ۴ (ب) مشاهده میشود، در هدف با نانو ذرات کوچکتر (منحنی سبز رنگ)، جمعیت الکترون هایی که در قسمت انتهایی تابع توزیع میباشند و بهطور مستقیم شتاب می گیرند نیز بیشتر از حالتهای دیگر است. این الکترونها که الکترونهای داغ میباشند، نقش بهسزایی در فرایند شتاب گیری پروتونها دارند.

همچنین برای واضح شدن نتایج، با در نظر گرفتن حالتی که شعاع نانوذرات بهصورت متغیر در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر میباشد (از آنجا که این حالت به واقعیت نزدیکتر میباشد)، نمودارهای فضای فاز مربوط به الکترونهای لایه فوم و نیز پروفایل فضایی میدان الکتریکی درست لحظهای که به هدف آلومینیمی میرسد بهترتیب در شکلهای ۵ و ۶ آورده شده است.

با مقایسه نمودار فضای فاز در دو حالت هدف نازک و ضخیم، مشاهده میشود که دستهای از الکترونها در حالت هدف ضخیمتر ۲۰ میکرومتری شتاب بیشتری گرفته و با سرعت بیشتری حرکت میکنند. این مطابق با نتایج حاصل از شکل ۴ برای طیف انرژی الکترونی است. اما آنچه که موجب کاهش شتاب پروتونی در این حالت میشود را میتوان از شکل ۶ که برای میدان الکتریکی رسم شده است نتیجه گرفت.

همان گونه که از شکل ۶ مشاهده می شود، شکل میدان الکتریکی در هدف بزرگتر نسبت به هدف کوچکتر به هم ریختگی بیشتری دارد و به صورت فیلمان ها جدا شده است. این به علت پراکندگی بیشتر شدت لیزری در هدف ضخیم تر و در نتیجه موجب کاهش عملکرد مؤثر شتاب دهی پروتون می شود.



شکل ۵. فضای فاز الکترونهای لایه فوم برای هدف با ضخامت الف) ۱۰ میکرومتر و ب) ۲۰ میکرومتر. شعاع نانو ذرات به صورت متغیر در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر می باشد.



شکل ۶. میدان الکتریکی درست لحظهای که به هدف آلومینیمی می رسد برای هدف با ضخامت الف) ۱۰ میکرومتر و ب) ۲۰ میکرومتر. شعاع نانو ذرات بهصورت متغیر در بازه ۱۰ تا ۱۲۰ نانومتر می باشد.

۴. نتیجهگیری

در این کار با به کارگیری ابزار شبیه سازی دوبعدی ذرهای نقش اندازه شعاع نانوذارت لایه فوم در فرایند شتابدهی پروتون در روش رایج TNSA مطالعه و بررسی شده است. ایده استفاده از ساختار نانو به جای ساختار ایدهآل یکنواخت برای لایه فوم بهمنظور نزدیک شدن به حالت واقعی مطرح شده است. در این پژوهش اثر شعاعهای مختلف ۱۰، ۶۰ و ۱۲۰ نانومتر و نیز شعاع متغیر بین ۱۰ و ۱۲۰ نانومتر در دو ضخامت ۱۰ و ۲۰ میکرومتری از لایه فومی بر روی شتابدهی پروتون و گرم شدن الكترونها شبيهسازي شده است. مطابق با نتايج بهدست آمده اندازههای متفاوت نانوذرات در هدف نازکتر تأثیری بر شتاب نهایی پروتون ندارند. در حالی که با بزرگشدن هدف مدت زمان حضور پالس لیزری در هدف بیشتر بوده و نانوذرات با شعاع بزرگتر موجب پراکندگی بیشتر پالس لیزری و در نتيجه كاهش بازدهى جذب انرژى الكترونها مىشوند. بهعلاوه محاسبات ما نشان میدهد که جذب انرژی و گرمایش الکترونها در هدف ضخیمتر بهتر صورت می گیرد که در این میان هر چه ساختار به صورت یکنواخت تر باشد (به عبارتی ذرات با اندازه شعاع کوچکتر استفاده شود) انرژی الکترونها بیشتر و شتابدهی پروتونها مؤثرتر اتفاق میافتد.

بهطور کلی، نتایج بهدست آمده در این کار نشان میدهد با به کارگیری لایه فومی با چگالی نزدیک بحرانی در فرایند شتاب دهی لیزری پروتون و کنترل پارامترهای آن میتوان انرژی نهایی پروتون را افزایش داد.

مراجع

- 1. V. Veksler, *The principle of coherent acceleration of charged particles*, The Soviet Journal of Atomic Energy, 2(5), 525 (1957)
- 2. E. Clark, et al. Energetic heavy-ion and proton generation from ultraintense laser-plasma interactions with solids, Phys. Revi. Lett. 85(8), 1654 (2000).
- 3. P. Poole, et al. *Laser-driven ion acceleration via target normal sheath acceleration in the relativistic transparency regime*, New J. Phys. 20(1), 013019 (2018).
- 4. H. Daido, M. Nishiuchi, A.S. Pirozhkov, *Review* of laser-driven ion sources and their applications, Rep. Progr. Phys. 75(5), 056401 (2012).
- 5. W. Leemans, et al., *Multi-GeV electron beams* from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime, Phys. Rev. Lett. 113(24), 245002 (2014).
- F. Wagner, et al. Maximum proton energy above 85 mev from the relativistic interaction of laser pulses with micrometer thick ch 2 targets, Phys. Rev. Lett. 116(20), 205002 (2016).
- S. Wilks, et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions, Physics of plasmas, 8(2), 542 (2001).

- 8. D. Neely, et al. Enhanced proton beams from ultrathin targets driven by high contrast laser pulses, Appl. Phys. Lett. 89(2), 021502 (2006).
- 9. D. Margarone, et al. *Laser-driven proton* acceleration enhancement by nanostructured foils, Phys. Rev. Lett. 109(23), 234801 (2012).
- F. Dollar, et al. *High contrast ion acceleration at intensities exceeding 10 21 W cm⁻²*, Phys. Plasmas. 20(5), 056703 (2013).
- T. Bartal, et al., Focusing of short-pulse highintensity laser-accelerated proton beams, Nat. Phys. 8(2), 139 (2012).
- 12. A. Sgattoni, et al. *Laser ion acceleration using a solid target coupled with a low-density layer*, Phys. Rev. E. 85(3), 036405 (2012).
- 13. E. Yazdani, et al. Enhanced laser ion acceleration with a multi-layer foam target assembly, Laser Part. Beams. 32(4), 509 (2014).
- L. Fedeli, et al. Ultra-intense laser interaction with nanostructured near-critical plasmas, Sci. Rep. 8(1), 3834 (2018).
- 15. L. Fedeli, et al. *Parametric investigation of laser interaction with uniform and nanostructured near-critical plasmas.* Eur. Phys. J. D. 71(8), 202 (2017).
- 16. A. Sgattoni, et al. Optimising piccante-an open source particle-in-cell code for advanced simulations on tier-0 systems, arXiv preprint arXiv:1503.02464 (2015).