



تأثیر ماده هدف بر تولید پرتو گاما و زوج الکترون-پوزیترون در برهمکنش لیزر فوق پرتوان با فلز

پیشداست، مسعود* - فرهبد، امیر حسین

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

در این پژوهش تأثیر نوع ماده هدف در برهمکنش لیزر فوق پرتوان از مرتبه چندین پتاوات با اهداف فلزی در تولید پرتو گاما از طریق پراکندگی غیر خطی کامپتون و تولید زوج الکترون-پوزیترون، توسط کد ذره در سلول (PIC) EPOCH در دو بعد مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای فلزات طلا، مس و منیزیوم انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که برهمکنش لیزر فوق پر شدت $4 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$ با اهداف فلزی با چگالی کمتر، منجر به افزایش تولید پرتو گاما و زوج الکترون-حفره می‌گردد. همچنین انرژی قطع طیف الکترون‌ها و پرتوهای گاما برای اهداف فلزی با چگالی کمتر، بیش از اهداف با چگالی بزرگتر است.

کلمات کلیدی: پلاسما الکترو دینامیک کوانتومی، تولید پرتو گاما، تولید زوج الکترون پوزیترون

The influence of the target's material on gamma ray and electron-positron pair production in ultra high power laser-metal interaction

Pishdast, Masoud* - Farahbod, Amir Hossein

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

The influence of the target's material on gamma ray production by nonlinear Compton scattering process and electron-positron pair production in ultra high power laser interaction with metallic targets have been investigated using two dimensional particle in cell code, EPOCH. Gold, Copper and Magnesium targets were used in the simulations. The results show that in the interaction of ultra high intense laser, $4 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$ with metallic targets, lower density targets produce higher value of gamma ray and electron-positron pair. Also, the cut of energy of electrons and gamma rays is higher for the lower density targets.

Keywords: Quantum electrodynamics plasma, gamma ray production, electron-positron pair



۱. مقدمه

بکارگیری فناوری تقویت پالس چیرپ^۱ (CPA) در سامانه‌های لیزری [۱،۲]، سبب افزایش چشم‌گیر توان لیزر در چند دهه اخیر شده است که نسل نوینی از لیزرهای بسیار پرتوان ($>10\text{PW}$) با شدتی بسیار بالا ($I > 10^{23}\text{ W/cm}^2$) را پدید آورده‌اند [۳]. این نوع لیزرها می‌توانند در برهم‌کنش با ماده، پلاسمایی کاملاً متفاوت و ابرنسبیتی^۲ تولید کنند [۴]. در چنین پلاسمایی، الکترون‌ها تا ضرایب لورنتس^۳ $\gamma \gg 1$ شتاب می‌گیرند. این پلاسما کاربردهای فراوان جالبی دارد و نشان داده شده است که می‌تواند به عنوان چشمه نور سینکروترونی^۴ رومیزی و برای تولید پلاسمای الکترون-پوزیترون چگال به کار رود [۲]. علاوه بر این، در چنین پلاسمایی، کاربردهای مرسوم پلاسمای نسبیتی از قبیل گداخت محصورسازی اینرسی سریع [۵]، شتابدهی یون‌ها تا انرژی‌های چندین GeV برای کاربردهای پزشکی [۶] و تولید هارمونیک‌های بالاتر برای تولید پالس‌های آتوثانیه [۷] می‌بایست در رژیم فرانسیبیتی مورد بازبینی قرار گیرند [۴،۸]. علی‌رغم مطالعات انجام شده در این حوزه، مفاهیم فیزیکی پلاسمای فرانسیبیتی بخوبی شناخته شده نیستند. حضور میدان‌های الکترومغناطیسی به اندازه کافی قوی در این پلاسما، منجر به واکنش‌های الکترودینامیک کوانتومی (QED) غیر خطی، گسیل فوتون گاما و تولید زوج الکترون-پوزیترون‌ها می‌شوند [۹]. در برهم‌کنش لیزر 10PW با پلاسما، پدیده‌های غالب QED غیر خطی عبارتند از گسیل فوتون‌های پرنرژی پرتو گاما (γh) از الکترون‌ها در میدان‌های الکترومغناطیسی لیزر از طریق فرایند پراکندگی غیر خطی کامپتون (گسیل سینکروترون)، $e^- + m\gamma_l \rightarrow e^- + \gamma_h$ و تولید جفت‌های الکترون-پوزیترون توسط فرایند بریت-ویلر^۵، $e^- + e^+ \rightarrow \gamma_l + \gamma_h + n\gamma_l$ است [۱۱-۹، ۲]. از آنجایی که جفت شدن بین فرایندهای QED و دینامیک پلاسما در پلاسمای الکترودینامیک کوانتومی بسیار پیچیده است، به نظر می‌رسد که مدل‌سازی‌های عددی تنها راه مطالعه این پدیده‌ها باشد. به منظور مطالعه پدیده‌های QED غیر خطی در برهم‌کنش لیزر و ماده، کد ذره در سلول چند بعدی EPOCH که اثرات QED در آن اعمال شده است توسط دانشگاه وارویک^۶ انگلستان ارائه شده است [۱۲]. ریدگرس^۷ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ میلادی اولین نتایج شبیه‌سازی برهم‌کنش لیزر 10PW با هدف جامد را با لحاظ نمودن فرایندهای QED مربوطه توسط این کد ارائه نمودند [۲]. بدنبال این مطالعه، مقالات متعددی در این حوزه ارائه گردید [۱۷-۱۳]. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر نوع ماده هدف بر تولید پرتو گاما و زوج الکترون-پوزیترون در برهم‌کنش لیزرهای فوق پرتوان با جامدات، برهم‌کنش لیزر با توان از مرتبه چندین پتاوات با اهداف فلزی طلا، مس و منیزیوم با

^۱ Chirped-pulse amplification

^۲ Ultra-relativistic plasma

^۳ Lorentz factor

^۴ Table top synchrotron radiation

^۵ Breit-Wheeler

^۶ Warwick

^۷ Ridgers

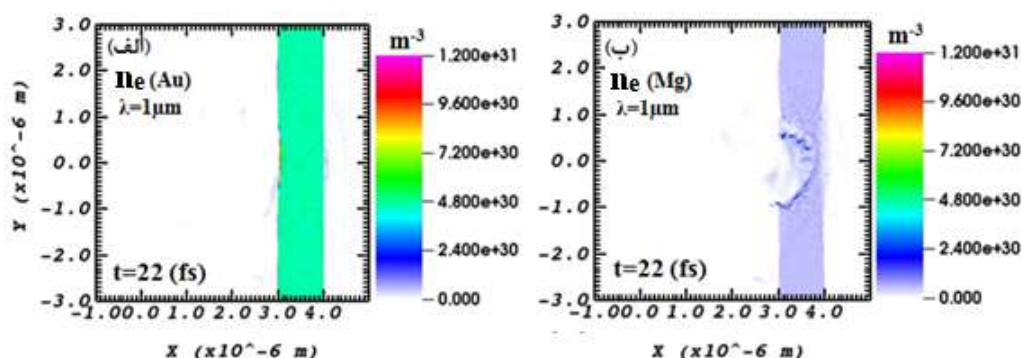
استفاده از کد ذره در سلول (PIC) EPOCH در دو بعد بررسی شده است. در بخش دوم این مقاله مشخصه‌های شبیه‌سازی بیان شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها در بخش سوم و نتیجه‌گیری نهایی در بخش چهارم آورده شده است.

۲. مشخصه‌های شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در دو بعد انجام شده است. از لیزر با قطبش خطی و پتانسیل برداری بهنجار شده لیزر، a_0 برابر با 540 (شدت $4 \times 10^{23} \text{ Wcm}^{-2}$) و طول موج $1 \mu\text{m}$ استفاده شده است که در راستای مثبت محور x حرکت می‌کند. نمایه مکانی لیزر به شکل گوسی در نظر گرفته شد که در لکه‌ای به شعاع کمتر از $1 \mu\text{m}$ بر روی هدف کانونی شده است. بازه زمانی پالس 20 fs با نمایه زمانی مربعی در نظر گرفته شد. اهداف فلزی کاملاً یونیده طلا، مس و منیزیوم به ضخامت $L = 1 \mu\text{m}$ ، چگالی‌های اولیه به ترتیب برابر $\rho(x, y) = 1/74,8/96,19/32 \text{ gcm}^{-3}$ برای $0 < x < L$ و $\rho(x, y) = 0$ در سایر نقاط در نظر گرفته شدند. اهداف بوسیله 20 ابر ذره الکترون و 10 ابر ذره یون در هر سلول نمایش داده می‌شود. محدوده شبیه‌سازی دو بعدی x و y با ابعاد $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ و با وضوح 10 nm در هر راستا لحاظ شده است.

۳. بحث و نتایج

شکل ۱ توزیع فضایی چگالی الکترونی را پس از برخورد لیزر با هدف (الف) طلا و (ب) منیزیوم نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، فشار تابشی لیزر هدف را فشرده ساخته و حفره‌ای در هدف جامد ایجاد می‌کند. بدلیل چگالی بالاتر طلا، فشار تابشی لیزر حفره بسیار کم عمق‌تری نسبت به منیزیوم ایجاد کرده است. حفره ایجاد شده در هدف مسی نیز عمیق‌تر از طلا و کوچک‌تر از منیزیوم حاصل شد که جهت خلاصه‌سازی در شکل آورده نشده است.



شکل (۱): توزیع فضایی چگالی الکترون‌ها در زمان 22 fs برای هدف (الف) طلا، (ب) منیزیوم

شکل ۲ (الف) و (ب) توزیع فضایی چگالی فوتون‌ها را در لحظه پایان لیزر به ترتیب برای هدف طلا و منیزیوم نشان می‌دهد. تولید پرتو گاما از مرتبه 10^2 m^{-3} مشاهده می‌گردد. دو مدل اخیر بیان کننده چگونگی تولید پرتوهای گاما در برهم‌کنش لیزرهای با توان 10 PW یا بالاتر با هدف جامد عبارتند از گسیل عمق-

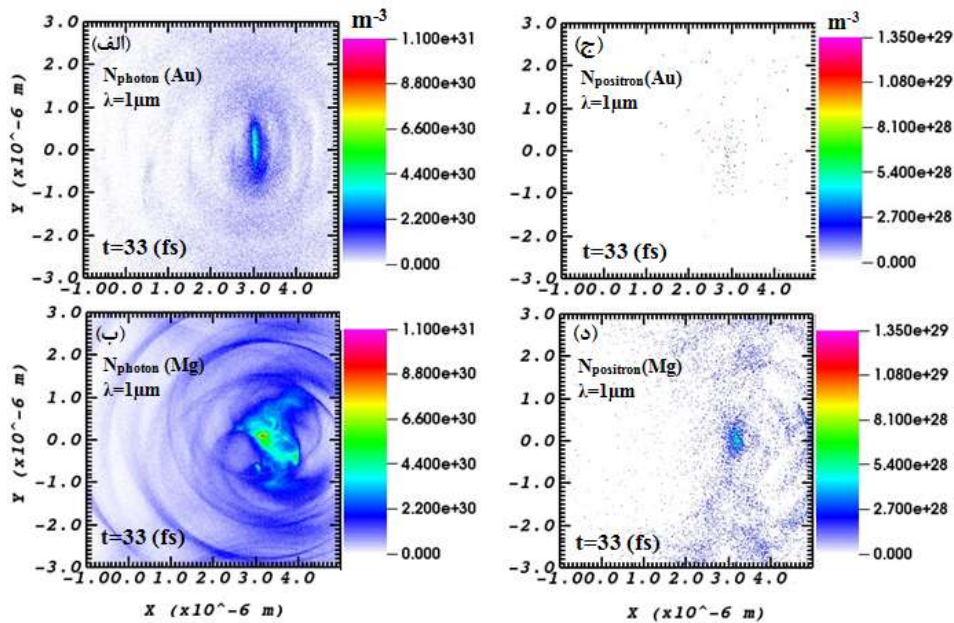


نفوذ^۱ [۲] و گسیل سینکروترون الکترون بازتزریق شده^۲ [۴] (RESE) هستند. مدل عمق-نفوذ، در ساختاری که پرتو لیزر توسط هدفی جامد با چگالی عددی الکترونی بزرگتر از چگالی بحرانی اصلاح شده نسبیتهی بازمی‌تابد، استفاده می‌شود که با توجه به چگالی اهداف استفاده شده در این تحقیق، سازوکار اصلی تولید پرتو گاما است. در این مدل پرتو لیزر قبل از بازتاب، تا چندین عمق نفوذ به درون هدف راه می‌یابد و الکترون‌ها را با نیروی پاندرماتیو به سمت جلو شتاب می‌دهد. سپس این الکترون‌ها با لیزر بازتابی برهم‌کنش می‌کنند و پرتوهای گاما تولید می‌شود. تا زمانی که لیزر حفره‌ای درون هدف ایجاد می‌کند، استخری از الکترون‌های تازه نفس برای شتابگیری و گسیل به محیط تزریق می‌گردد. محدودیت این سازوکار، تعداد الکترون‌های درون عمق نفوذ و کاهش شدت لیزر در زمان نفوذ به هدف است [۱۸]. نتایج نشان می‌دهند که میزان تولید پرتوهای گاما برای هدف طلا بسیار کمتر از منیزیوم است و بیشترین توزیع فضایی پرتوهای گامای گسیل شده منطبق بر ناحیه حفره ایجاد شده در هدف است، جایی که اغلب الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی شتاب داده شده‌اند. با توجه به اینکه چگالی طلا بیش از ده برابر چگالی منیزیوم است، عمق نفوذ لیزر و حفره ایجاد شده در منیزیوم بسیار بزرگتر از طلا است و در این ناحیه از هدف منیزیوم الکترون‌های فراوانی برای شتابگیری توسط لیزر فرودی و بازتابی وجود دارد که می‌تواند منجر به تابش بیشتر پرتوهای گاما در این ناحیه گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای هدف مسی نیز نشان می‌دهد که میزان تولید پرتو گاما برای این هدف بیش از طلا و کمتر از منیزیوم است. لذا به نظر می‌رسد استفاده از اهداف جامد با چگالی کمتر منجر به افزایش میزان پرتوهای گامای گسیلی توسط فرایند گسیل عمق-نفوذ می‌گردد.

شکل ۲ (ج) و (د) نیز توزیع فضایی چگالی پوزیترون‌ها را به ترتیب برای هدف طلا و منیزیوم نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، میزان پوزیترون‌های تولید شده برای هدف طلا بسیار کمتر از هدف منیزیوم است. همچنین میزان پوزیترون‌های تولید شده برای هدف مسی بیشتر از طلا و کمتر از منیزیوم بدست آمد. با توجه به اینکه مطابق شکل ۲ (الف) و (ب)، میزان تولید پرتو گاما در هدف طلا کمتر از منیزیوم است و این حقیقت که طبق فرایند بریت-ویلر، پرتوهای گاما عامل اصلی تولید زوج الکترون-پوزیترون هستند، انتظار می‌رود که میزان پوزیترون در هدف طلا کمتر از منیزیوم باشد. تولید پوزیترون در این اهداف از مرتبه $10^{28} m^{-3}$ تا بیش از $10^{29} m^{-3}$ مشاهده گردید. میزان پوزیترون تولید شده در ناحیه حفره ایجاد شده در هدف بیشترین مقدار را دارد. زیرا در این ناحیه هم پالس لیزر فرودی و هم پالس بازتابی، پوزیترون تولید می‌کنند [۱۳]. این پلاسمای چگال الکترون-پوزیترون محبوس شده در کاواک ناحیه حفره هدف می‌تواند بطور بالقوه برای مطالعه این گونه پلاسمای مفید باشد. توزیع طیفی الکترون‌ها و فوتون‌ها برای هدف طلا و منیزیوم نیز به ترتیب در شکل ۳ (الف) و (ب) با هم مقایسه شده‌اند.

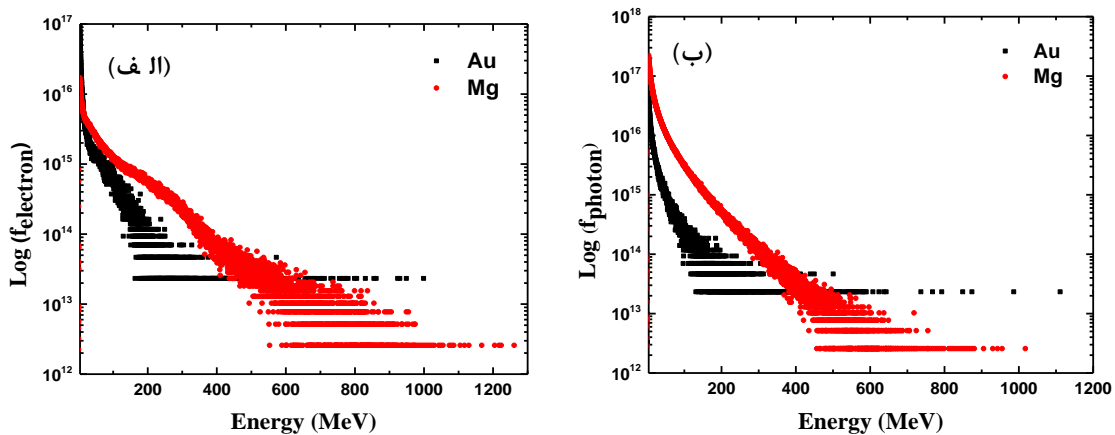
^۱ Skin-depth emission

^۲ Re-injected electron synchrotron emission



شکل (۲): توزیع فضایی چگالی فوتون‌ها برای هدف الف (طلا، ب) منیزیوم و توزیع فضایی چگالی پوزیترون‌ها برای هدف ج (طلا، د) منیزیوم

بر اساس این نتایج، الکترون‌ها تا مرتبه GeV شتاب گرفته‌اند. همچنین انرژی قطع طیف الکترون‌های سریع در هدف منیزیوم (در حد ۱۰۰۰ MeV) بیشتر از طلا است. بدلیل گسیل بیشتر سینکروترون الکترون‌ها از طریق فرایند پراکندگی کامپتون غیر خطی در هدف منیزیوم نسبت به طلا، شکل ۲ (الف) و (ب)، انتظار می‌رود که الکترون‌ها انرژی بیشتری در هدف منیزیوم از دست دهند و لذا انرژی قطع پایین‌تری نسبت به الکترون‌ها در هدف طلا داشته باشند. ولی از طرفی به نظر می‌رسد دلیل بالاتر بودن انرژی قطع الکترون‌ها در منیزیوم، ایجاد حفره عمیق‌تر در آن و در نتیجه بوجود آمدن فضای شتابدهی بزرگتر است. انرژی قطع فوتون‌ها نیز در هدف منیزیوم بیشترین مقدار و در هدف طلا کمترین مقدار را دارد.



شکل (۳): الف) توزیع طیفی الکترون‌ها و ب) فوتون‌ها در زمان ۳۳ fs (پایان لیزر) برای هدف طلا و منیزیوم



۴. نتیجه گیری :

در این پژوهش، تاثیر ماده هدف بر تولید پرتو گاما و زوج الکترون-پوزیترون در برهم کنش لیزر فوق پرتوان از مرتبه چندین پتاوات با اهداف فلزی توسط کد ذره در سلول EPOCH با قابلیت الکترودینامیک کوانتومی در دو بعد بررسی گردید. نتایج برای اهداف فلزی طلا، مس و منیزیوم با هم مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در برهم کنش لیزر فوق پر شدت $4 \times 10^{13} \text{ Wcm}^{-2}$ با اهداف فلزی چگال، چشمه‌های پرتو گاما و زوج‌های الکترون-حفره با چگالی‌های بالا تولید می‌گردد. فشار تابشی لیزر، هدف جامد فوق چگال را فشرده ساخته و حفره‌ای در هدف جامد ایجاد می‌کند. بدلیل چگالی بالاتر طلا، فشار تابشی لیزر، حفره بسیار کم عمق‌تری در این ماده نسبت به مس و منیزیوم ایجاد کرد. بیشترین میزان پرتوهای گامای تولید شده برای هدف منیزیوم و کمترین برای طلا بدست آمد. بیشترین توزیع فضایی پرتوهای گامای گسیل شده منطبق بر ناحیه تغییر شکل داده شده در هدف است، جایی که اغلب الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی شتاب داده شده‌اند. بنابراین، استفاده از اهداف جامد با چگالی کمتر منجر به افزایش میزان پرتوهای گامای گسیلی توسط فرایند گسیل عمق-نفوذ می‌گردد. گسیل پرتوهای گاما عمدتاً در مخروطی با نیم زاویه کمتر از 40° درجه اتفاق افتاده است. میزان پوزیترون‌های تولید شده برای هدف طلا بسیار کمتر از هدف منیزیوم است. همچنین میزان پوزیترون‌های تولید شده برای هدف مسی بیش از طلا و کمتر از منیزیوم است. میزان پوزیترون تولید شده در ناحیه حفره ایجاد شده در هدف بیشترین مقدار را دارد. الکترون‌ها از مرتبه GeV شتاب می‌گیرند و انرژی قطع طیف الکترون‌های سریع در هدف منیزیوم بیشتر از طلا است. انرژی قطع فوتون‌ها در هدف منیزیوم بیشترین مقدار و در هدف طلا کمترین مقدار را دارد.

مراجع :

- [۱] P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Mourou, Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification, *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 398 (1988).
- [۲] C. P. Ridgers, C. S. Brady, R. Ducloux, J. G. Kirk, K. Bennett, T. D. Arber, A. P. L. Robinson, A. R. Bell, Dense Electron-Positron Plasmas and Ultraintense rays from Laser-Irradiated Solids, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 165006 (2012).
- [۳] G. A. Mourou, C. L. Labaune, M. Dunne, N. Naumova, V. T. Tikhonchuk, Relativistic laser-matter interaction: from attosecond pulse generation to fast ignition, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **49**, B667 (2007).
- [۴] C. S. Brady, C. P. Ridgers, T. D. Arber, A. R. Bell, J. G. Kirk, Laser Absorption in Relativistically Underdense Plasmas by Synchrotron Radiation, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 245006 (2012).
- [۵] M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky, W. L. Kruer, S.C. Wilks, J. Woodworth, E. M. Campbell, M. D. Perry, R. J. Mason, Ignition and high gain with ultra-powerful laser, *Phys. Plasmas* **1**, 1626 (1994).
- [۶] B. M. Hegelich, B. J. Albright, J. Cobble, K. Flippo, S. Letzring, M. Paffett, H. Ruhl, J. Schreiber, R.K. Schulze, J. C. Fernandez, Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams, *Nature* **439**, 441 (2006).



- [۷] B. Dromey, M. Zepf, A. Gopal, K. Lancaster, M. S. Wei, K. Krushelnick, M. Tatarakis, N. Vakakis, S. Moustazis, R. Kodama, M. Tambo, C. Stoeckl, R. Clarke, H. Habara, D. Neely, S. Karsch, P. Norreys, High harmonic generation in the relativistic limit, *Nat. Phys.* **2**, 456 (2006).
- [۸] P. Goldreich and W. H. Julian, Pulsar Electrodynamics, *Astrophys. J.* **157**, 869 (1969).
- [۹] H. Hu, C. Muller, C. H. Keitel, Complete QED Theory of Multi-photon Trident Pair Production in Strong Laser Fields, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 080401 (2010).
- [۱۰] J. G. Kirk, A. R. Bell, I. Arka, Pair production in counter-propagating laser beams, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **51**, 085008 (2009).
- [۱۱] A. DiPiazza, K. Z. Hatsagortsyan, C. H. Keitel, Quantum Radiation Reaction Effects in Multiphoton Compton Scattering, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 220403 (2010).
- [۱۲] T.D. Arber, K. Bennett, C.S. Brady, A. Lawrence-Douglas, M.G. Ramsay, N.J. Sircombe, P. Gillies, R.G. Evans, H. Schmitz, A.R. Bell, C.P. Ridgers, Contemporary particle-in cell approach to laser plasma modeling, *Plasma Phys. Control. Fusion* **57**, 113001 (26pp) (2015).
- [۱۳] W. Luo, Yi-Bo Zhu, Hong-Bin Zhuo, Yan-Yun Ma, Ying-Ming Song, Zhi-Chao Zhu, Xiao-Dong Wang, Xing-Huo Li, I. C. E. Turcu, M. Chen, Dense electron-positron plasmas and gamma-ray bursts generation by counterpropagating quantum electrodynamics-strong laser interaction with solid targets, *Phys. Plasmas* **22**, 063112 (2015).
- [۱۴] C.S. Brady, C.P. Ridgers, T.D. Arber, A.R. Bell, Synchrotron radiation, pair production, and longitudinal electron motion during 10-100 PW laser solid interactions, *Phys. Plasmas* **21**, 033108 (2014).
- [۱۵] Xing-Long Zhu, Yan Yin, Tong-Pu Yu, Fu-Qiu Shao, Zhe-Yi Ge, Wei-Quan Wang, Jin-Jin Liu, Enhanced electron trapping and γ ray emission by ultra-intense laser irradiating a near-critical-density plasma filled gold cone, *New J. Phys.* **17**, 053039 (2015).
- [۱۶] H. X. Chang, B. Qiao, T. W. Huang, Z. Xu, C. T. Zhou, Y. Q. Gu, X. Q. Yan, M. Zepf, X. T. He, Brilliant petawatt gamma-ray pulse generation in quantum electrodynamic laser-plasma interaction, *Nature*, Scientific reports (2017).
- [۱۷] Y.J. Gu, O. Klimo, S. Weber, G. Korn "High density ultrashort relativistic positron beam generation by laserplasma interaction, *New J. Phys.* **18** (2016).
- [۱۸] C.S. Brady, C.P. Ridgers, T.D. Arber, A.R. Bell, *Control. Fusion* **55**, 124016 (5pp) (2013).