



تأثیر تابش سینکروترون بر انرژی الکترون‌ها در برهم‌کنش فرانسیتی لیزر با پلاسمای کم چگال

پیشدست، مسعود* - فرهبد، امیر حسین - جمال الدین، یزدان پناه

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

چکیده:

در این مقاله تاثیر تابش‌های سینکروترون بر انرژی الکترون‌ها در برهم‌کنش لیزر فوق پرتوان با پلاسمای کم چگال توسط شبیه‌سازی ذره در سلول در یک بعد مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای لیزر با شدت $2 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$ و پروفایل زمانی گوسی با پهنای کل در نصف بیشینه (FWHM) 15 fs و 32.5 fs انجام شده است. انرژی قطع فوتون‌های بوجود آمده در برهم‌کنش پالس 15 fs بیش از دو برابر انرژی قطع فوتون‌های حاصل از پالس 32.5 fs بدست آمد و برای هر دو پالس، الکترون‌ها تا مرتبه چندین گیگا الکترون ولت شتاب می‌گیرند. محاسبات نشان می‌دهند که لحاظ نمودن اثرات تابش سینکروترون، منجر به کاهش حدود ۱ گیگا الکترون ولتی انرژی قطع الکترون‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: الکترو دینامیک کوانتومی پلاسما، تابش سینکروترون، انرژی الکترونی

The influence of synchrotron radiation on the energy of the electrons in ultra relativistic laser interaction with under-dense plasma

Pishdast, Masoud* - Farahbod, Amir Hossein- Jamalaldin, Yazdanpanah

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

Abstract

The influence of high energy synchrotron radiations on the energy of the electrons in ultra high power laser interaction with under dense plasma has been investigated using one dimensional particle in cell code simulation. Laser with $4 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$ peak intensity and Gaussian temporal profile with FWHM=15 fs and 32.5 fs were considered in the simulations. The cut off energy of the photons produced by 15 fs pulse is twice as big as the one produced by 32.5 fs pulse and electrons accelerate up to multi GeV for both pulses. The results show that considering the effects of synchrotron radiation results in about 1 GeV reduction of the cut off energy of electrons.

Keywords: Quantum electrodynamics plasma, synchrotron radiation, electron energy



۱. مقدمه

طی سالیان اخیر، دسترسی تجربی به باریکه‌های لیزر با شدتی از مرتبه 10^{22} W/cm^2 امکان‌پذیر شده است [۱]. دستاوردهای جدید در حوزه فناوری لیزر نشان می‌دهد که در آینده‌ای نه چندان دور، شدت باریکه لیزر در برخی سامانه‌های در حال ساخت از مرز 10^{25} W/cm^2 فراتر خواهد رفت [۲-۴]. در میدان الکترومغناطیسی قوی چنین لیزرهایی ($E > 10^{10} \text{ V/m}$)، برهمکنش لیزر و پلاسما به شدت غیر خطی است و ملاحظات الکترودینامیک کوانتومی (QED) ایفای نقش می‌کند و رفتار کلاسیکی ذرات در میدان‌های لیزر به طور قابل توجهی نیازمند اصلاح است. ناحیه مذکور می‌تواند حوزه نوینی را جهت مطالعه در زمینه فیزیک هسته‌ای، ذرات، کیهان‌شناسی و فیزیک چگالی انرژی بالا در اختیار پژوهشگران قرار دهد [۵]. در ناحیه نزدیک QED، الکترون‌های نسبیتی نوسان‌کننده در میدان فوق پر شدت لیزر، تابش پر شدتی گسیل می‌کنند که در محدوده انرژی پرتوهای گاما قرار دارد [۵]. در چنین فرایندهایی، میدان تابشی توسط ذرات با شتاب افزایشدهنده و یا کاهشدهنده، به اندازه کافی قوی است که بر خود ذره تاثیر می‌گذارد که این پدیده به عنوان واکنش تابش^۱ (RR)، میرایی تابش^۲ و یا واکنش-عقب تابش^۳ شناخته شده است [۶-۹]. این فرایندها به شدت غیر خطی هستند و مطالعه آنها بطور تجربی بسیار دشوار است با این حال مطالعات نظری گسترده‌ای در این خصوص انجام شده است [۵]. در سال‌های اخیر به کمک ابر رایانه‌ها امکان مطالعه عددی این فرایندها در شبیه‌سازی‌های در مقیاس بزرگ با لحاظ نمودن اثرات QED و RR در کدهای محاسباتی فراهم آمده است [۱۰-۱۴، ۵]، که اغلب اثرات QED را در برهمکنش لیزر با اهدافی با چگالی فراتر از چگالی بحرانی اصلاح شده نسبیتی و یا نزدیک چگالی بحرانی مطالعه نموده‌اند. با افزایش شدت لیزر، نوسان الکترون ایجاد شده بوسیله میدان تابشی قوی‌تر می‌شود و نیروی میرایی تابش با نیروی لورنتس برابری می‌کند. در این حالت معادله حرکت الکترون بصورت معادله اصلاح شده (۱) نوشته می‌شود [۶]:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{\beta} \times \vec{B}) + \frac{2e^2}{3c} \vec{g}_0 \quad (1)$$

که m ، e و c به ترتیب بار الکترون، جرم الکترون و سرعت نور در خلاء هستند. $\vec{\beta} = \vec{v}/c$ سرعت الکترونی بهنجار شده و $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$ اندازه حرکت الکترون، \vec{E} و \vec{B} نیز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند. جمله اول این معادله نیروی لورنتز و دومین جمله نیروی میرایی تابش است [۶]. با خلاصه‌سازی معادله (۱)، نیروی میرایی در حالت فرانسبیتی با معادله (۲) بیان می‌شود [۱۲].

$$\vec{F}_r = \frac{2e^2}{3c} \vec{g}_0 \approx -\left(\frac{2e^4}{3m_e^2 c^5}\right) \gamma^2 \vec{v} \times [(\vec{E} + \vec{\beta} \times \vec{B})^2 - (\vec{\beta} \cdot \vec{E})^2] \quad (2)$$

¹ Radiation reaction

² Radiation damping

³ Radiation back-reaction



افت انرژی ناشی از میرایی تابشی با افزایش شدت لیزر بیشتر می‌شود. با استفاده از معادلات (۱) و (۲) این افت بصورت معادله (۳) تخمین زده می‌شود [۹]:

$$\frac{d\gamma}{\gamma_0} = -\frac{e^2 \omega_0^2}{m_e c^3} \gamma^2 a_0^2 \quad (3)$$

دامنه بهنجار میدان الکتریکی لیزر و $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0$ فرکانس لیزر است. در ناحیه نزدیک QED، گسیل فوتون QED شامل دو فرایند است: (۱) گسیل فوتون‌های پر انرژی پرتو گاما (γ_{photon}) از الکترون‌ها در میدان‌های الکترومغناطیسی لیزر از طریق فرایند پراکندگی غیر خطی کامپتون (تابش سینکروترون اصلاح شده کوانتومی)، $e^- + m\gamma_{\text{laser}} \rightarrow e^- + \gamma_{\text{photon}}$ ، فوتون لیزر است، و تولید جفت‌های الکترون-پوزیترون توسط فرایند چند فوتونی بریت-ویلر^۱، $\gamma_{\text{photon}} + m\gamma_{\text{laser}} \rightarrow e^- + e^+$ [۱۵]. در این مقاله تاثیر پدیده‌های RR و تابش سینکروترونی الکترون‌ها بر انرژی الکترون‌ها در برهمکنش لیزر فوق پر توان با پلاسما کم چگال با استفاده از روش ذره در سلول (PIC) در یک بعد بررسی شده است. برای این منظور از کد PIC بنام EPOCH که اثرات الکترودینامیک کوانتومی در آن گنجانده شده است، با لحاظ نمودن مازول‌های تابش و RR، در شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید [۱۶]. در بخش دوم این مقاله به مشخصه‌های شبیه‌سازی اشاره شده است. بحث و نتایج در بخش سوم، و بخش پایانی نیز به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

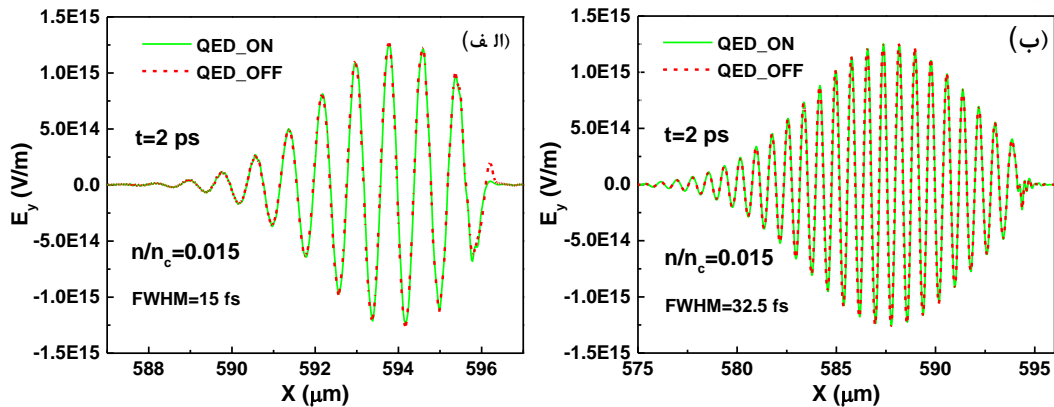
۲. مشخصه‌های شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در یک بعد انجام شده است. از لیزر با قطبش خطی و پتانسیل برداری بهنجار شده لیزر، a_0 ، برابر با ۳۱۵ (شدت $2 \times 10^{22} \text{ Wcm}^{-2}$) و طول موج $0.8 \mu\text{m}$ استفاده شده است که در راستای مثبت محور x انتشار می‌یابد. از دو پالس لیزر با پهناهای (FWHM) برابر ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs استفاده گردید. هدف پلاسما کم چگال هیدروژن گونه با چگالی $n = 0.15 n_c$ در نظر گرفته شده است که n_c چگالی بحرانی پلاسما است. فضای شبیه‌سازی برابر با $600 \mu\text{m}$ و با تفکیک ۲۰ nm لحاظ گردید. هدف به کمک ۲۰ ابر ذره الکترون و ۲۰ ابر ذره یون در هر سلول نمایش داده می‌شود.

۳. بحث و نتایج

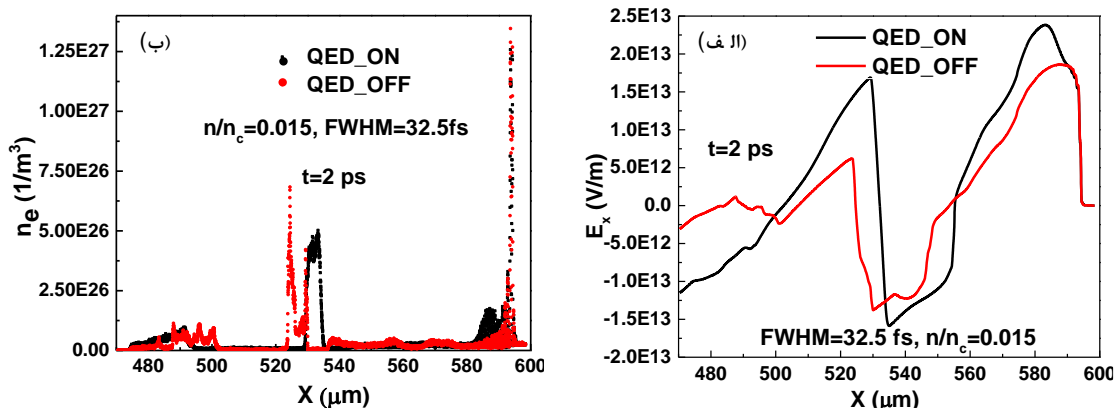
شکل ۱ (الف) و (ب) میدان‌های عرضی دو پالس با پهنای زمانی به ترتیب ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs را در زمان ۲ ps پس از برهمکنش لیزر با پلاسما در دو حالت، پدیده‌های کوانتومی تابش سینکروترون و RR لحاظ شده و نشده (به ترتیب QED_ON و QED_OFF) نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برای هر دو پالس، در نظر گرفتن این پدیده‌ها اثر قابل توجهی بر انتشار پالس لیزر در پلاسما نداشته است. میرایی و جذب قسمت‌های ابتدایی پالس لیزر در حین انتشار درون پلاسما برای هر دو پالس بوضوح قابل مشاهده است.

¹ Breit-Wheeler



شکل (۱): میدان‌های عرضی دو پالس با پهنای زمانی (الف) ۱۵ fs و (ب) ۳۲/۵ fs در زمان ۲ ps پس از برهمکنش لیزر با پلاسما در دو حالت، با و بدون اثرات QED (به ترتیب QED_ON و QED_OFF).

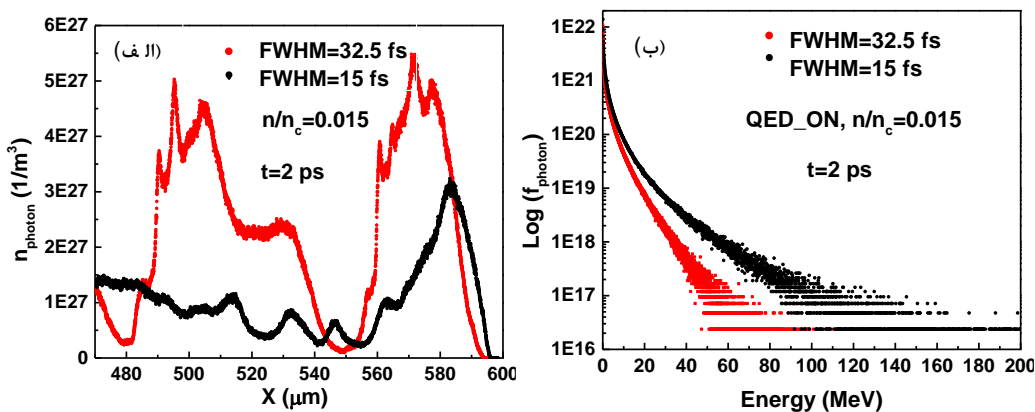
شکل‌های ۲ (الف) و (ب) به ترتیب میدان الکتریکی طولی (عقبه) و چگالی عددی الکترونی را در زمان ۲ ps پس از برهمکنش لیزر با پلاسما در دو حالت QED_OFF و QED_ON و برای پالس با FWHM برابر با ۱۵ fs نشان می‌دهند. میدان عقبه با لحاظ نمودن اثرات RR و تابش سینکروترون بجز در قسمت انتهایی پالس، قوی‌تر از حالت QED_OFF است. مطابق با شکل ۲ (ب) دسته‌های الکترونی با بیشینه چگالی حدود ۱۰۰ برابر چگالی الکترونی اولیه پلاسما در دو فاصله ۶۰۰-۵۸۰ μm و ۵۴۰-۵۲۰ μm شکل گرفته است. همانطور که مشخص است دسته‌های الکترونی شکل گرفته در حالتی که اثرات RR و تابش سینکروترون لحاظ گردیده است نسبت به حالت QED_OFF تا حدودی پهنای بزرگتری دارد. زمانی که اثر RR لحاظ می‌گردد الکترون‌ها تحت تاثیر نیروی میرایی رو به عقب قرار می‌گیرند و برخی از آنها به سمت پشت لیزر پس زده می‌شوند [۵]، که می‌تواند منجر به پهن شدن بیشتر دسته‌های الکترونی گردد. میدان عقبه پالس ۱۵ حدود ۱/۵ برابر پالس ۳۲/۵ fs و بیشینه چگالی الکترونی دسته‌های الکترونی ایجاد شده توسط پالس ۱۵ حدود ۴۰۰ برابر چگالی الکترونی اولیه پلاسما مشاهده شد.



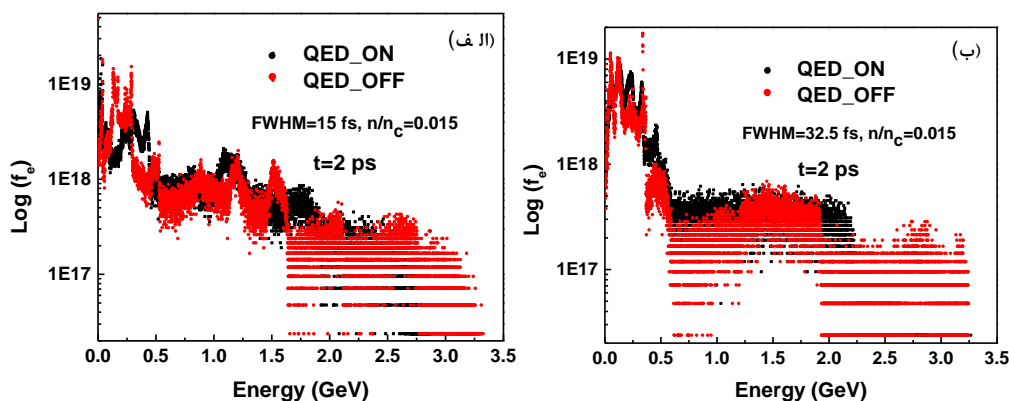
شکل (۲): (الف) میدان الکتریکی طولی (عقبه) و (ب) چگالی عددی الکترونی در زمان ۲ ps پس از برهمکنش لیزر با پلاسما در دو حالت QED_OFF و QED_ON. پهنای پالس برابر با ۳۲/۵ fs است.



الکترون‌های پس زده شده در حال نوسان تابش قوی گاما گسیل می‌کنند. توزیع چگالی فوتون‌های گاما برای پالس‌های ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs و در زمان ۲ ps پس از برهمکنش با لیزر در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است. بیشینه چگالی پرتو گاما برای پالس ۳۲/۵ fs حدود دو برابر پالس ۱۵ fs است. شکل ۳ (ب) نیز توزیع طیفی فوتون‌ها را برای پالس‌های ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs در زمان ۲ ps نشان می‌دهد. انرژی قطع فوتون‌های بوجود آمده در برهمکنش پالس ۱۵ fs بیش از دو برابر پالس ۳۲/۵ fs است که دلیل آن می‌تواند میدان عقبه قوی‌تر و میزان بیشتر الکترون‌های شتاب گرفته در برهمکنش پالس ۱۵ fs با پلاسما باشد.



شکل ۳: (الف) توزیع چگالی فوتون گاما و (ب) توزیع طیفی فوتون‌ها برای پالس‌های ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs در زمان ۲ ps. شکل ۴ (الف) و (ب) توزیع طیفی الکترون‌ها را در زمان ۲ ps و به ترتیب برای پالس‌های ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs در دو حالت QED_OFF و ON نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که برای هر دو پالس، الکترون‌ها تا مرتبه چندین گیگا الکترون ولت (GeV) شتاب می‌گیرند. لحاظ نمودن اثرات RR و تابش گاما، منجر به کاهش حدود ۱ GeV انرژی قطع الکترون‌ها شده است که دلیل آن پس‌زنی الکترون‌ها و افت انرژی آنها بر بدلیل تابش سینکروترونی است.



شکل ۴: (الف) توزیع طیفی الکترون‌ها برای پالس‌های ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs در دو حالت QED_OFF و ON و در زمان ۲ ps.



۴. نتیجه گیری :

تأثیر تابش سینکروترون و واکنش تابش (RR) بر انرژی الکترون‌ها در برهم‌کنش لیزر فوق پرتوان با پلاسما کم چگال توسط شبیه‌سازی ذره در سلول (PIC) در یک بعد مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها برای لیزر فوق پر شدت $2 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$ با دو پهنای در نصف بیشینه ۱۵ fs و ۳۲/۵ fs انجام شده است. نتایج نشان دادند که در نظر گرفتن تابش سینکروترون و واکنش تابش الکترون‌ها اثر قابل توجهی بر انتشار پالس لیزر در پلاسما ندارد. لحاظ نمودن پدیده‌های RR و تابش سینکروترون، بجز در قسمت انتهایی پالس، میدان عقبه قوی‌تری ایجاد می‌کند. دسته‌های الکترونی شکل گرفته در این حالت نیز تا حدودی پهنای بزرگتری نسبت به حالت اثرات الکتروستاتیک کوانتومی لحاظ نشده دارد. میدان عقبه پالس ۱۵ fs حدود ۱/۵ برابر پالس ۳۲/۵ fs و بیشینه چگالی الکترونی دسته‌های الکترونی ایجاد شده توسط پالس ۱۵ fs حدود ۴۰۰ برابر چگالی الکترونی اولیه پلاسما مشاهده شد. بیشینه چگالی پرتو گاما برای پالس ۳۲/۵ fs حدود دو برابر پالس ۱۵ fs بدست آمد. انرژی قطع فوتون‌های بوجود آمده در برهم‌کنش پالس ۱۵ fs بیش از دو برابر انرژی قطع فوتون‌های حاصل از پالس ۳۲/۵ fs است. نتایج نشان دادند که، برای هر دو پالس، الکترون‌ها تا مرتبه چندین گیگا الکترون ولت (GeV) شتاب می‌گیرند و لحاظ نمودن پدیده‌های RR و تابش گاما، منجر به کاهش حدود ۱ GeV انرژی قطع الکترون‌ها می‌شود.

مراجع :

- [۱] Yanovsky V, et al, "Ultra-high intensity- 300-TW laser at 0.1 Hz repetition rate" *Optics Express*, **Vol. 16**, Issue 3, 2109-2114 (2008).
- [۲] Extreme Light Infrastructure European Project (www.eli-beams.eu)
- [۳] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T and Limpert J, "The future is fibre accelerators", *Nature Photonics*, **Vol. 7**, 258-261 (2013).
- [۴] Chriaux Get al" Apollon-10P: Status and implementation", *AIP Conference Proceedings*, **Vol. 462**, 78 (2012).
- [۵] Xing-Long Zhu, Yan Yin, Tong-Pu Yu, Fu-Qiu Shao, Zhe-Yi Ge, Wei-Quan Wang and 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.*, **Vol. 17**, 053039 (2015).
- [۶] Landau L D and Lifshitz E M, "The Classical Theory of Fields", **Vol. 2**, *Oxford: Butterworth-Heinemann*, ch 9, pp 222-9.
- [۷] Yu T P, Pukhov A, Sheng Z M, Liu F and Shvets G, "Bright Betatronlike X Rays from Radiation Pressure Acceleration of a Mass-Limited Foil Target", *Phys. Rev. Lett.* 110, 045001(2013).
- [۸] Chen M, Pukhov A, Yu T P and Sheng Z M, "Radiation reaction effects on ion acceleration in laser foil interaction", *Plasma Phys. Control. Fusion*, **Vol. 53**, 014004 (2011).
- [۹] Koga J, Esirkepov T Z and Bulanov S V, "Nonlinear Thomson scattering in the strong radiation damping regime", *Physics of Plasmas*, **Vol. 12**, 093106 (2005).



- [۱۰] Ridgers CP, Brady CS, Duclous R, Kirk J G, Bennett K, Arber T D, Robinson A P L and Bell A R,” Dense Electron-Positron Plasmas and Ultraintense γ rays from Laser-Irradiated Solids, *Phys. Rev. Lett*, **Vol.** 108, 165006 (2012).
- [۱۱] Brady CS, Ridgers CP, Arber T D, Bell A R and Kirk J G, “Laser Absorption in Relativistically Underdense Plasmas by Synchrotron Radiation” *Phys. Rev. Lett*, **Vol.** 109, 245006 (2012).
- [۱۲] Ji L L, Pukhov A, Kostyukov I Y, Shen B F and Akli K,” Radiation-Reaction Trapping of Electrons in Extreme Laser Fields”, *Phys. Rev. Lett*, **Vol.** 112, 145003 (2014).
- [۱۳] Ji L L, Pukhov A, Nerush E N, Kostyukov I Y, Shen B F and Akli KU, “Energy partition, γ -ray emission, and radiation reaction in the near-quantum electrodynamic regime of laser-plasma interaction”, *Physics of Plasmas*, **Vol.** 21, 023109 (2014)
- [۱۴] Ji L L, Pukhov A, Nerush E N, Kostyukov I Y, Akli KU and Shen B F,” Near QED regime of laser interaction with overdense plasmas”, *Eur. Phys. J. Spec. Top*, **Vol.** 223, 1069 (2014).
- [۱۵] Erber T,” High-Energy Electromagnetic Conversion Processes in Intense Magnetic Fields”, *Rev. Mod. Phys*, **Vol.** 38, 626 (1966).
- [۱۶] 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*, **Vol.** 57, 113001 (2015).