همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

تأثیر پارامتر نسبیتی بر بازده نانو خوشه الکترونی در پلاسمای چگال

فاطمه خدادادی آزادبنی*

استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

چکیده: پالس های همدوس آتو ثانیه نگرشی جدید را به سمت مطالعات دقیقی از فرآیندهای الکترونی فوق سریع در اتم‌ها و مولکولها گشوده است. استفاده از الکترونهای پر انرژی تولید شده در برهمکنش لیزر-پلاسما، طرحی موثر در تولید اشعه ایکس همدوس پرشدت است. به ازای پارامترهای خاصی از لیزر و پلاسما، نمودارهای توزیع چگالی الکترونی در سطح پلاسما یک افزایش ناگهانی در ناحیه‌ای از فضا به ابعاد نانومتر خواهد داشت. نیروی پاندرماتیو الکترونها را در خوشه‌هایی با ابعاد نانومتر مقابل سطح پلاسما به حرکت در آورده و شتاب می‌دهد. خوشه‌ها بدلیل شتاب داشتن، تابشی همدوس با پهنای زمانی آتوثانیه گسیل می‌کنند. ناهمسانگردی دمایی و ناپایداری ویبل نسبیتی می‌توانند خوشه های الکترونی با دیرش آتو ثانیه تولید کنند که یک روش جالب برای تولید و تقویت پالسهای فوق کوتاه موزون خواهد بود. در این مقاله، اثر نسبیتی و ناهمسانگردی دمایی بر تولید نانو خوشه های الکترونی آتوثانیه مورد بحث قرار گرفته است. محاسبات نشان می دهد که با کاهش پارامتر نسبیتی با ضریب ۲ و افزایش ٪۱۴/۶ نرخ رشد ناپایداری ویبل نسبیتی منجر به حدود ٪۶۲ کاهش زمان اشباع بهره نانوخوشه و اشباع چگالی تولید شده خواهد شد. چگالی نانوخوشه برای پارامتر نسبیتی ۳ =γ و عددموج۳= kc/ω_{pe} به یک بیشینه مقداری برابر با $۲/۱۲\times۱۰^{۳۷}$ خواهد رسید.

کلید واژگان: نانو خوشه الکترونی؛ پالس آتو ثانیه؛ ناهمسانگردی دمایی؛ پارامتر نسبیتی.

The Effect of Relativity Parameter on the Efficiency of Electron Nanobunch in Dense Plasma

F. Khodadadi Azadboni

Assistant Professor, Department of Physics, Farhangian University, Tehran, Iran

Abstract- Attosecond extreme ultraviolet pulses open a way to study basic ultrafast electronic processes in atoms and molecules with unprecedented precision. The relativistic Weibel instability and temperature anisotropy can generate electron bunches of attosecond duration that makes it an attractive method for the generation and amplification of tunable ultrashort pulses. In this paper, the relativistic effect and temperature anisotropy upon generating attosecond electron bunches is investigated. Calculations show that with reduction relativistic parameter, γ by a factor of 2 and increasing 14.6% of the relativistic Weibel instability growth rate leads to about 62% reduction of the nanobunching gain saturation time and the density perturbation generated by the temperature anisotropy and the Weibel instability. The nanobunching density perturbation has a maximum value corresponding to 2.12×10^{37} for wavenumber $kc/\omega_{pe}=1.33$ and $\gamma=3$. Evidence of ultrashort electron bunches could be applied to attosecond electron and coherent x-ray production.

Keywords: Attosecond Pulse; Electron Nanobunch; Temperature Anisotropy; Relativistic Parameter.

*F.khodadadi@cfu.ac.ir

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت در ساخت لیزرهایی با توان بالا برای رسیدن به پالس‌هایی با طول موجهای کوتاه و شدت بالا، دریچه‌ی تازه‌ای برای تحقیقات و مطالعات بنیادی و کاربردی در زمینه پالس‌های آتوثانیه گشوده است[۳-۱]. تحقیقاتی که نه تنها به فیزیک اتمی- مولکولی بلکه به رشته‌هایی همچون پزشکی، بیولوژی، محیط زیست، نانوتکنولوژی و انرژی هسته‌ای کمک فراوانی خواهد نمود. تاکنون طرحهای مختلفی برای تولید پالس آتوثانیه، مانند طرح استفاده از هماهنگ‌های مرتبه بالا، پراکندگی تحریک رامان و مدولاسیون مولکولی بررسی شده است[۶-۴]. در این روشها قطار پالس به جای یک پالس منفرد تولید می شوند. برای اندازه‌گیری دینامیک الکترونها درون اتم‌ها و مولکولها تپ‌های آتوثانیه‌ای منفرد مفیدتر هستند. حضور خوشه‌های الکترونی فوق کوتاه بطور تجربی در نزدیکی هدفهای جامد ضخیم در خلأ دیده شده است [۷]. این خوشه‌ها می‌توانند برای شتابدهنده های میدان دنباله ای، میکروسکوپی و پراش الکترونی آتوثانیه و یا از طریق پراکندگی تامسون برای تولید اشعه ایکس و رادیوگرافی بکار رود[۸]. ایجاد این چنین خوشه‌های الکترونی کاملاً به پارامترهای لیزر فرودی و پلاسما بستگی دارد. زمانی که یک پالس کوتاه لیزر فوق العاده به شدت بالا با پلاسمای چگال برهمکنش می‌کند، ناهمسانگردی انرژی جنبشی متوسط پلاسما می‌تواند انرژی آزادی فراهم کند که انواع مختلفی از ناپایداری‌های الکترومغناطیسی را در پلاسما بوجود آورد. یکی از ناپایداری های پلاسما که توسط یک توزیع سرعت ناهمسانگرد ذرات پلاسما ایجاد می‌شود، ناپایداری ویبل است[۹]. ناپایداری ویبل نقش مهمی در مکانیسم انتقال انرژی در پلاسما و توقف الکترونهای داغ بازی می‌کند. هدف این مقاله بررسی عوامل تاثیر گذار از جمله نقش ناهمسانگردی دمایی، اثرات نسبیتی و گرادیان چگالی بر تولید نانو خوشه‌های الکترونی و پالس آتوثانیه است.

۲- روش کار

نیروی پاندرماتیو لیزر ناشی از فشار تابشی پالس فرودی، موجب شتاب گرفتن الکترونها و خارج شدن آنها از سطح پلاسما می‌گردد. یک گروه از کانتورهای جریان الکترونی از طریق نقاط صفر در میدان الکترومغناطیسی به طرف خارج پلاسما تحت فشار قرار می‌گیرند. توزیع چگالی الکترونی به اوج خود رسیده و خوشه‌های فوق کوتاه نسبیتی شکل می‌گیرند. شکل۱- (الف) شماتیکی از تولید نانوخوشه‌های الکترونی و ناپایداری ویبل در برهمکنش لیزر-هدف را نشان می دهد. به ازای پارامترهای خاصی از لیزر و پلاسما، نمودارهای توزیع چگالی الکترونی در سطح پلاسما یک افزایش ناگهانی در ناحیه‌ای از فضا به ابعاد نانومتر خواهد داشت. نیروی پاندرماتیو پالس لیزر فرودی الکترونها را در خوشه‌هایی با ابعاد نانومتر مقابل سطح پلاسما به حرکت در آورده و شتاب می‌دهد. سپس با پهنای زمانی بسیار کم از مرتبه آتوثانیه از خوشه‌ها بدلیل شتاب داشتن، تابشی همدوس در ناحیه اشعه X گسیل می‌کنند. پالس تابش شده دارای پهنای زمانی آتوثانیه است و دیگر نیازی به فیلتر فرکانسی ندارند. خوشه‌ی الکترونی کوتاه در چندین هزار میکرون باید در میان پلاسمای چگال منتشر شوند که طی آن می‌تواند ناپایداری به سرعت در حال رشد ویبل بر آن اعمال شود. برای تولید پالس آتوثانیه از لیزری که میدان الکتریکی آن در حدود فمتوثانیه تغییر جهت می‌دهد به عنوان منبع محرک الکترون استفاده می‌شود. بر اثر برهمکنش لیزرهای فمتوثانیه و پرشدت با ماده و ایجاد پلاسما، الکترونهای پرشتاب با سرعتهای نسبیتی ایجاد می‌شوند. در حد نسبیتی، دینامیک الکترونها از حل معادله والاسوف نسبیتی

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{v}.\frac{\partial f}{\partial \vec{r}}+e\left(\vec{E}+\frac{\vec{v}}{c}\times\vec{B}\right)\frac{\partial f}{\partial \vec{p}}=0 \qquad (۱)$$

بدست می‌آید که در آن e و m به ترتیب بار و جرم الکترون، E و B میدانهای الکترومغناطیسی و v سرعت الکترون می‌باشد. تابع توزیع اولیه الکترونهای نسبیتی با ناهمسانگردی دمایی بصورت

$$f_0(p_\perp^2,p_\parallel)=\delta(p_\perp-\hat{p}_\perp)exp(-mc^2\gamma/T_\parallel)/(4\pi m_e c\gamma_\perp p_\perp K_1(a)), \qquad (۲)$$

تعریف می‌شود. جائیکه γ فاکتور لورنتس نسبیتی، $\gamma_\perp$ مولفه عرضی فاکتور لورنتس نسبیتی، $K_1(a)$ تابع بسل اصلاح شده نوع دوم مرتبه اول و $a=m_ec^2\gamma_\perp/T_\parallel$ کمیت بدون بعد است. با تعریف تابع توزیع پراکندگی، $Z(\xi)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{e^{-t^2}}{(t-\xi)}dt$ و $\xi=\sqrt{\frac{a}{2}}\frac{\omega}{kc}$ رابطه پراکندگی بصورت

$$1-\frac{k^2c^2}{\omega^2}-\frac{\sqrt{\eta}\omega_{pe}^2K_0(a\prime)}{\hat{\gamma}_\perp\omega^2K_1(a)}+\sqrt{\frac{\pi}{2a\prime}}\frac{T_\perp}{m_ec^2K_0(a\prime)}\frac{\omega_{pe}^2}{\hat{\gamma}_\perp^2\omega^2}\left(1+\frac{1}{2a\prime}\right)-\sqrt{\frac{\pi}{2a\prime}}\frac{\omega_{pe}^2}{\hat{\gamma}_\perp^2\omega^2}\frac{T_\perp}{T_\parallel K_0(a\prime)}\left(1-\xi Z(\xi)+\frac{1}{a\prime}+\frac{1}{a\prime}\xi^2+\frac{1}{a\prime}\xi^3Z(\xi)\right)=0 \qquad (۳)$$

تعریف می‌شود. در حد $|\xi|\ll 1$، تابع پراکندگی عبارتست از $Z(\xi)=-2\xi+\frac{4}{3}\xi^3-\cdots+i\sqrt{\pi}e^{-\xi^2}$. بنابراین رابطه پراکندگی بصورت

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]

$$-\frac{k^2c^2}{\omega^2}-\sqrt{\eta}\frac{\omega_{pe}^2}{\hat{\gamma}_\perp\omega^2}\frac{K_0(a\prime)}{K_1(a)}+\frac{1}{6}\frac{\omega_{pe}^2}{\hat{\gamma}_\perp^2\omega^2}\frac{\sqrt{2\pi}}{\alpha a\prime K_0(a\prime)}\frac{T_\perp}{T_{||}}(1+4a)-\frac{\pi}{2kc}\frac{\omega_{pe}^2}{\hat{\gamma}_\perp^2\omega^2}\frac{\omega}{K_0(a\prime)}\frac{T_\perp}{T_{||}}=0 \qquad (۴)$$

ساده می شود. با توجه به اینکه فرکانس انتشار مدهای الکترومغناطیسی $\omega=\omega_r+i\delta$ است، نرخ رشد ناپایداری ویبل برابر با

$$\boldsymbol{\delta=\frac{kc}{2}\frac{\sqrt{2/\pi}}{a^{5/2}}\left[1+4a-\frac{2a^{5/2}}{\beta\sqrt{2\pi}}\left(\frac{K_0^2(a)}{K_1(a)}+\frac{k^2c^2\hat{\gamma}_\perp K_0(a)}{\omega_{pe}^2}\right)\right]} \qquad (۵)$$

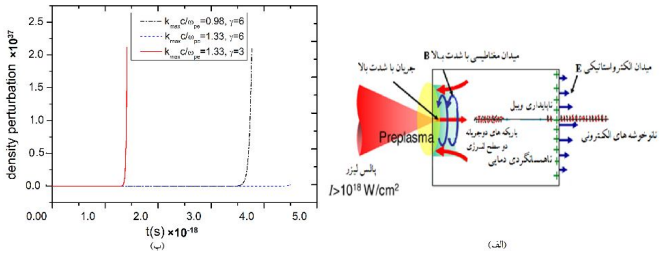
است. فاکتور خوشه شونده به صورت تبدیل فوریه آشفتگی چگالی به تعداد ذرات $\boldsymbol{b(k)=\frac{1}{N}\int f exp(-ik.r)drdp}$ تعریف می‌شود. پارامترخوشه شوندگی بصورت

$$\boldsymbol{g(k)=\frac{\langle|b(k)|^2\rangle}{\langle|b_0(k)|^2\rangle}=\left((\delta^2-\left(\frac{kc\beta}{\gamma^2\omega_{pe}}\right)^2)/(4\delta^2-12\left(\frac{kc\beta}{\gamma^2\omega_{pe}}\right)^2)\right)^2 exp(2\delta\omega_{pe}t)} \qquad (۶)$$

بدست می آید. دراینجا N تعداد ذرات در باریکه، $\beta=T_\perp/T_{||}$ ناهمسانگردی دمایی، k عدد موج، c سرعت نور و ω_{pe} فرکانس پلاسما است.

۲- نتایج و بحث

با حل معادله ۶، آشفتگی چگالی به عنوان تابعی از زمان در شکل ۱-(ب) نشان داده شده است. برای بردار موج نرمالیز شده متناظر با نرخ رشد بیشینه ناپایداری $k_{max}c/\omega_{pe}$ =۱/۳۳ و پارامتر نسبیتی γ=۳، آشفتگی چگالی برای $t>$ ۱/۴۱۲×۱۰$^{-۱۸}$ s به سرعت افزایش می‌یابد و به مرحله اشباع می‌رسد. برای فاکتور خوشه شوندگی بزرگتر از ۴۶ درصد اثرات غیرخطی مهم می‌شوند که منجر به اشباع بهره خواهد شد. آشفتگی چگالی نانو خوشه یک بیشینه مقداری برابر با ۲/۱۲×۱۰^{۳۷}خواهد داشت. با افزایش عدد موج و کاهش نرخ رشد ناپایداری، همانطوریکه زمان برهمکنش افزایش می‌یابد، آشفتگی چگالی بطور یکنواخت کاهش می‌یابد. در این ناحیه، فاکتور خوشه شوندگی خیلی کوچک است و برای $t>$ ۷×۱۰$^{-۱۷}$s، آشفتگی چگالی به صفر میل می‌کند. برای γ=۳، اشباع بهره در فاصله زمانی ۱/۴۱۱۹۸ آتوثانیه اتفاق می‌افتد. در حالیکه برای γ=۶، اشباع بهره در فاصله زمانی ۳/۷۶۷۲۳۷۳ آتوثانیه اتفاق می‌افتد. این موضوع را می‌توان به افزایش جرم نسبیتی باریکه الکترون که باعث آهسته‌تر شدن حرکت الکترونها و در نتیجه کاهش جریان باریکه می‌شود، نسبت داد. افزایش پارامتر نسبیتی، γ، با ضریب ۲، منجر به حدود ۰/۲۸ درصد افزایش آشفتگی چگالی نانو خوشه و حدود ۲/۶۷ برابر افزایش مدت زمانی می‌شود. با کاهش پارامتر نسبیتی با ضریب ۲ و افزایش ٪۱۴/۶ نرخ رشد ناپایداری ویبل نسبیتی منجر به حدود ٪۶۲ کاهش زمان اشباع بهره نانوخوشه و اشباع چگالی تولید شده توسط ناهمسانگردی دمایی و ناپایداری ویبل نسبیتی خواهد شد. این ویژگی ناپایداری ویبل موجب تقویت تولید پلس آتوثانیه می‌شود.



شکل۱-(الف) شماتیک تولید نانوخوشه‌های الکترونی در برهمکنش لیزر-هدف. (ب) آشفتگی چگالی به عنوان تابعی از زمان برای بیشینه اعداد موج $k_{max}c/\omega_{pe}$ و پارامتر نسبیتی γ مختلف.

مراجع

1. L. Young *et. al*. **Nature 466**, 56–61 (2010).
2. S. Bengtsson *et. al*. **Nat. Photonics 11**, 252–258 (2017).
3. P. Corkum and F. Krausz, **Nat. Phys. 3**, 381–387 (2007).
4. M. Sabbar *et. al*. **Nat. Phys. 13**, 472–478 (2017).
5. P. Lan *et. al*. **Phys. Plasmas 13**, 013106 (2006).
6. A. Turpin *et. al*. **Sci. Rep. 7**, 43888 (2017).
7. S. D. Baton *et. al*. **Phys. Rev. Lett. 91**, 105001 (2003).
8. A. Marinelli *et. al*. **Phys. Rev. Lett. 110**, 064804 (2013).
9. E.S. Weibel, **Phys. Rev. Lett. 2**, 83 (1959).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]