بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۹۵ بهمن ۱۳۹۵



23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology Tarbiat Modares University, Tehran, Iran January 31- February 2, 2017

بررسی امواج غیرخطی سالیتون در برهم کنش لیزر پرتوان با پلاسمای کم چگال

مصطفى صادقزاده، اسماعيل اسلامي

دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران

چکیده – این مقاله به بررسی تشکیل سالیتون و امواج نوسانی در انتشار پرتو لیزر از میان پلاسما اختصاص داده شده است. بالا و پایین بودن شدت لیزر تحت فرکانسهای مختلف پلاسما مورد مطالعه قرار گرفته است. ما پوش سالیتونهای لیزری، پتانسیل الکترواستاتیک wakefield و چگالی پلاسما را در برهم کنش نسبیتی لیزر-پلاسما مورد بررسی قرار دادهایم. نتایج نهایی ما در این مقاله به درک رفتار سالیتونها در تقابل بین شدت لیزر و فرکانس پلاسما را در برهم کنش شده است. نتایج نشان میدهد محدوده فرکانسی برای شدت لیزر ۱/۱ (غیرنسبیتی)، از ۳ تا ۹ ، برای شدت لیزر برابر ۱/۸ (نزدیک مرز نسبیتی)، از ۱/۸ تا ۹، و در شدت لیزر برابر ۱/۵ (بالای مرز نسبیتی)، از ۳ تا ۹، متغیر خواهد بود. برای شدت لیزر ۳ (نسبیتی)، و ۱۰ (فوق نسبیتی)، محدوده فرکانسی برای تشکیل سالیتون از ۱/۸تا ۹ و از ۱/۱ تا ۸ متغییر خواهد بود.

كليد واژه- برهم كنش ليزر با پلاسما، امواج ساليتوني، فركانس و شدت ليزر، فركانس پلاسما

Study of nonlinear Soliton wave by the interactions of high power laser with underdense plasma

Mostafa Sadeghzadeh, Esmail Eslami

Iran university of science and technology-Narmak-Tehran

Abstract- This article was devoted to investigate the formation of soliton and oscillation waves in propagation of laser beam through the plasma. Low and high incident laser intensity under different plasma frequencies were studied. We have investigated laser envelope solitons, plasma electrostatic wake fields and plasma density sharp peaks in relativistic laser-plasma interaction. Our final results was devoted to understand the behavior of solitons in competition between laser intensity and plasma frequency. It is observed that the frequency range of the solitons formation are 3 to 9, 1.8 to 9, 3 to 9, 1.8 to 9 and 1.1 to 8, for the normalized laser intensities are, respectively, 0.1 (non relativistic), 0.8 (near of relativistic border), 1.5 (above of relativistic border), 3 (relativistic) and 10 (ultra relativistic).

Keywords: Laser-plasma interactions, soliton wave, laser frequency and intensity, plasma frequency

۱- مقدمه

امروزه برهم کنش لیزرهای پرتوان با پلاسما به جهت کاربردهای فراوان در صنعت، مورد توجه ویژهای قرار گرفته است[1]. از جنبههای فیزیکی حاکم در برهم کنش لیزرهای پرتوان (دارای شدت ۱۰^{۱۸} w/cm²) با پلاسما، اثرات غیرخطی تولید شده در حالت پلاسمای نسبیتی از جمله تولید امواج سالیتونی میباشد. سالیتونها بیانگر امواج غیرخطی موضعی به حالت پایدار میباشند که بحث اصلی مقاله روی امواج غیرخطی سالیتونی در پلاسما میباشد[2].

۲- فرمول بندی مسئله
معادلات حاکم بر امواج الکترومغناطیسی (لیزر) که به معادلات
ماکسول معروف هستند، به صورت زیر می باشد:

$$\nabla \times B = \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} - \frac{4\pi e}{c} nv \tag{1}$$

$$\nabla \cdot E = 4\pi e \left(n_i - n \right) \tag{(1)}$$

برای امواج الکترومغناطیس با بردار پتانسیل A رابطه $A \times \nabla B = W$ و پتانسیل A رابطه $A \times \nabla B = B = V = E + \nabla P = \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$ باشد که - $E = -\nabla P = \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$ باشد که - R = V = R و سرعت سیال می $n \cdot e$ باشد. معادلات هیدرودینامیک حاکم بر پلاسما سرد به صورت زیر میباشد.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla . \left(\frac{nP}{\gamma m}\right) = 0 \tag{()}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + v \cdot \nabla(P) = -e \left[E + \frac{1}{c} v \times B \right] \tag{(f)}$$

کمیت p معرف تکانه نسبیتی برای الکترونها که به صورت رابطه $p = \gamma mv$ و کمیت γ بیانگر فاکتور نسبیتی که به صورت رابطه $\frac{1}{c^2} (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-1}$ میباشد. با معرفی کمیتهای بدون بعد $v' = \frac{q}{c} = \frac{q}{\gamma} = \beta$, $q = \frac{p}{mc}$, $r' = k_p r$, $t' = \omega_p t$: (نرمالیزه) از جمله: $r' = k_p r$, $t' = \omega_p t$: $v' = \frac{q}{c} = \frac{q}{\gamma} = \beta$, $q = \frac{p}{mc}$, $r' = \frac{k_p}{r}$, $r' = \frac{q}{mc^2}$, $n' = \frac{n}{n_0}$ پلاسما، $n = \frac{p}{mc}$ (نرمالیزه) بلاسما و n_0 چگالی غیراختلالی

پلاسما، a پتانسیل برداری نرمالیزه میدان الکتریکی لیزر (پارامتر قدرت لیزر)، ¢ پتانسیل اسکالر نرمالیزه میدان الکترواستاتیک (پتانسیل Wake) پلاسما میباشد. با نرمالیزه کردن معادلات ماکسول لیزر و هیدرودینامیک پلاسما نتایج به صورت زیر میشود:

$$\nabla^2 a - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = \frac{1}{c} \nabla \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\left(k_p \right)^2 nq}{\gamma} \tag{(b)}$$

$$\nabla^2 \phi = \left(k_p\right)^2 (n-1) \tag{(\%)}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \left(\frac{nq}{\gamma}\right) = 0 \tag{(Y)}$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial(q-a)}{\partial t} = \nabla(\phi - \gamma) \tag{A}$$

ما فرض کردیم که انتشار امواج لیزر در راستای z باشد. با اعمال کمیتهای نرمالیزه $(z_{s}-v_{s})^{*} = e_{p}(z_{s}-v_{s})^{*}$ در معادلات (۵) تا (۸)، آنها را ساده می کنیم و بعد از سادهسازی، از معادلات (۲) و (۸) مقادیر γ ، $n \ p \ q$ را با استفاده از انتگرال-گیری به دست می آوریم [3]. حالا با داشتن مقادیر γ ، $n \ p \ q$ اعمال آنها در معادلات (۵) و (۶)، دو معادله دیفرانسیلی کوپل شده مرتبه دوم نرمالیزه شده به دست می آید که به صورت رابطه (۹) و (۱۰) می باشد [5], [4]:

$$\frac{d^{2}a}{d\xi^{2}} + \omega^{2}a = \frac{\sqrt{\frac{1 - \varepsilon^{2}}{\left(\sqrt{1 + (a_{0})^{2}} + \phi\right)^{2} - \varepsilon^{2}(1 + a^{2})}}}{\varepsilon^{2}}a$$

$$\frac{\frac{d^{2}\phi}{d\xi^{2}} = n - 1}{= \frac{\sqrt{\left(\sqrt{1 + (a_{0})^{2}} + \phi\right)^{2} - \varepsilon^{2}(1 + a^{2})}}{\varepsilon^{2}}} \left(\sqrt{1 + (a_{0})^{2}} + \phi\right) - 1}$$

(1.)

(٩)

دو رابطه بالا معرف رفتار سالیتونها (امواج غیرخطی) در پلاسما میباشد. پارامتر ε به عنوان مشخصه پلاسما که به صورت $\left[\left(\theta_{\mu}\right)^{-1}\right] = \omega$ همان فرکانس نرمالیزه لیزر میباشد.[5]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.



پاکسیل برداری ترمانیره میدان المتریدی هر (n (طط آبی رنگ)، پنکسیل اسکاتر ترمانیره الکترواستاتیک wake field (ϕ) (خط قرمز رنگ) و چگالی الکترون n (نقطهچین مشکی رنگ) برحسب کُ برای حالت (a) $n_0=0/9$ ، $a_0=0/9$ (b) $\varepsilon=0/2$ (c) $\varepsilon=0/2$ (b) $\varepsilon=0/2867 a_0=10$







شكل ۸: بررسى تغييرات تعداد ساليتون برحسب *a*



شکل ۱: یتانسیل برداری نرمالیزه میدان الکتریکی لیزر a (خط آبی رنگ)، یتانسیل اسکالر نرمالیزه الکترواستاتیک wake field (¢) (خط قرمز رنگ) و چگالی الکترون n (نقطهچین مشکی رنگ) برحسب کم برای حالت (a) 1/1=0 ، 9/9=6 ، س=5)



شكل ۲: بررسى تغييرات عرض پوش ساليتونى برحسب ٥

شکل ۴: بررسی تغییرات تعداد سالیتون برحسب ۵

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

از ۳ تا ۹ میباشد، اگر شدت برابر 0/8 (نزدیک مرز نسبیتی)، ۱/۵ (بالای مرز نسبیتی)، ۳ (نسبیتی) و ۱۰ (فوقنسبیتی) باشد، آنگاه محدوده فرکانسی برای تشکیل سالیتون، به ترتیب از 1/8 تا 9، ۳ تا ۹، ۱/۸ تا ۹ و ۱/۱ تا ۸ می باشد. البته یک نتیجه مهم دیگر در شکل های ۲، ۳ و ۴ این است که با افزایش فركانس نرماليزه ليزر، ما شاهد افزايش دامنه ساليتونها، تعداد سالیتونها و همچنین عرض پوش سالیتونی میباشیم، البته فقط در یک محدوده فرکانسی بین ۳ تا ۸ در شکل (۳)، با افزایش فرکانس نرمالیزه، ما شاهد کاهش عرض پوش سالیتونی هستیم که در این مورد باید دلیل کاهش را در کار آزمایشگاهی به صورت عملی بررسی شود که این پیشنهادی برای انجام پروژههای بعدی میباشد. برای حالتهایی که در شکل ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است، بررسیها نشان میدهد که اگر فرکانس نرمالیزه لیزر برابر 1/1 باشد، محدوده شدت برای تشکیل سالیتون از ۹ تا ۱۰ میباشد، اگر فرکانس برابر 1/8، ۳ و 8 باشد، آنگاه محدوده شدت برای تشکیل سالیتون، به ترتيب از 0/8 تا 10، 0/01 تا 10 و 0/1 تا 9 مى باشد. البته یک نتیجه مهم دیگر که در شکلهای ۶، ۷ و ۸ هم مشاهده می شود، این است که با افزایش شدت نرمالیزه لیزر، ما شاهد افزایش دامنه سالیتونها، تعداد سالیتونها و همچنين عرض پوش ساليتوني ميباشيم.

مراجع

- [1] D. Batani, C. J. Joachain, S. Martellucci, and A. N. Chester, *Atoms, Solids, and Plasmas in Super-Intense Laser Fields.* 2001.
- [2] M. Lontano, "Relativistic Electromagnetic Solitons Produced by Ultrastrong Laser Pulses in Plasmas," *AIP Conf. Proc.*, p. 87, 2002.
- [3] P. Sprangle, E. Esarey, and A. Ting, "Nonlinear theory of intense laser-plasma interactions," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, p. 2011, 1990.
- [4] X. Bai-Song and Y. Xin-Tao, "Stable Propagating Waves and Wake Fields in Relativistic Electromagnetic Plasma," *Commun. Theor. Phys.*, vol. 49, p. 753, 2008.
- [5] B. S. Xie and S. C. Du, "Solitons in relativistic laser-plasma interactions," *Front. Phys. China*, vol. 2, p.178, 2007.

۳- نمایش و تحلیل نمودارها

از حل معادلات کوپل شده، پارامترهای a و n برحسب راستای انتشار لیزر) به دست میآید. ما قصد داریم رفتار ξ سالیتونها را با تغییر دادن شدت نرمالیزه لیزر و فرکانس نرمالیزه لیزر بررسی کنیم. حالت اول، کمیت شدت را ثابت (برابر ۰/۰۱) و فرکانس را تغییر میدهیم. از طرفی بررسیها در حالت پلاسمای کم چگال انجام شده است، پس فركانس ليزر از پلاسماى پلاسما بزرگتر خواهد شد. شكل (1) قسمت (a) بیانگر تغییرات در w=1/1، w=0/9، قسمت (b) برای . میباشد. $\omega=9$ ، $\omega=0/19$ و قسمت (c) برای $\omega=0/199$ می برای حالت (a)، به دلیل ناچیز بودن مقدار فرکانس نرمالیزه لیزر، اثر نیروی پاندرماتیو کم می باشد و به تبع آن امواج غيرخطي ساليتوني تشكيل نمي شود. شكل (١) قسمت (b) و (c)، فركانس نرماليزه ليزر داراي مقدار بالايي ميباشد، يعني فركانس ليزر به ترتيب ۵ و ۹ برابر فركانس پلاسما شده است. پس در این حالت باعث شده که نیروی پاندرماتیو بسیار قوی در سیستم اعمال شود و چگالی الکترون را در پوش سالیتونی به مقدار تقریبا صفر برساند. سالیتونها در شکل، به صورت خط آبی رنگ مشاهده می شوند. برای بررسی دیگر حالاتی که دارای شدت نرمالیزه لیزر ثابت می باشند، نمودارهای ۲، ۳ و ۴ در نظر گرفته شده که برای بررسی کلی رفتار سالیتونها در پلاسما می باشد. حالت دوم، کمیت w را ثابت نگه داشته و را تغییر می دهیم و تغییرات به وجود آمده را در حالت a_0 در e=0/3، a=0/3، e=0/3، a=0/3 در (b) در e=0/3، a=0/1(۵) برای a.=10، $\varepsilon=0/2867$ میباشد. توضیحات شکل (۵) قسمت (a)، همانند شکل (۴) قسمت (a) می باشد. برای هردو حالت قسمت (b) و (c)، شدت نرمالیزه لیزر دارای مقدار بالایی می باشد که باعث شده نیروی پاندر ماتیو بسیار قوی در سیستم اعمال شود و چگالی الکترون را در پوش سالیتونی به مقدار تقریبا صفر برساند. برای بررسی دیگر حالاتی که دارای فرکانس نرمالیزه لیزر ثابت می باشند، نمودارهای ۶، ۷ و ۸، برای بررسی کلی رفتار سالیتونها در نظر گرفته شده است.

۴- نتیجهگیری

برای حالتهایی که در شکل ۲، ۳ و۴ نشان داده شده است، بررسیها نشان میدهد که اگر شدت نرمالیزه لیزر برابر ۰/۱ (غیرنسبیتی) باشد، محدوده فرکانسی برای تشکیل سالیتون