



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## مطالعه ناهمسانگردی فضای سرعت در سیستم بییم \_ پلاسما چگال همجوشی

محمد مهدوی\*، هنگامه خانزاده

دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

### چکیده:

انتقال انرژی الکترونیهای پرنرژی به قلب سوخت متراکم و مطالعه عوامل مؤثر بر آن، از مهم‌ترین مسائل در سناریوی اشتعال سریع است. در این تحقیق، باتوجه به نقش ناپایداری الکترومغناطیسی و بیبل در تعدیل فرآیند انتقال، نرخ رشد ناپایداری در یک پلاسما جفت‌شدگی قوی که مستلزم حضور برخوردهای کولنی در پلاسما زمینه است با ارائه دو مدل از تابع توزیع فضای سرعت،  $\delta$  و Bi-Maxwellian، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده بیانگر کاهش نرخ رشد در حضور برخوردهای کولنی و نقش مؤثر توزیع حاکم بر سیستم بر مقادیر نرخ رشد می‌باشند.

**کلید واژه:** اشتعال سریع، ناپایداری و بیبل، برخوردهای کولنی

### مقدمه:

سناریوی اشتعال سریع به عنوان یک روش بسیار نویدبخش برای همجوشی اینرسی فرآیندی دو مرحله‌ای است که بر دو محرک اشاره دارد. در ابتدا قرص دوتریوم و تریتیوم بوسیله یک لیزر بدون آنکه مشتعل شود پیش-فشرده می‌شود و پس از آن، اشتعال سوخت بوسیله یک لیزر پتاوات که بر کناره‌های قرص تزریق می‌شود، اجرا می‌گردد. زمانیکه چنین لیزری با هدفی جامد برهمکنش می‌کند، بواسطه نیروی پاندرماتیو مرتبط با میدانهای الکترومغناطیسی پرشدت لیزر، بیم‌هایی از الکترونیهای نسبیتی در سطح چگالی بحرانی تشکیل می‌شوند [۱]. مسیر حرکت چنین الکترونیهای پرنرژی MeV به سمت ناحیه کوچکی از سوخت فشرده است و از اینرو می‌تواند منجر به اشتعال قرص پیش‌فشرده شوند. جریان الکترونی رو به جلویی که بوسیله الکترونیهای بییم حمل می‌شود (بزرگتر از حد آلفن)، برای حفظ شبه خنثایی بار پلاسما بوسیله یک جریان بازگشتی پلاسما جبران می‌شود که این مسئله منجر



## بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

به ناپایداری سیستم و ظهور ناپایداریهای شناخته شده‌ای از نوع ناپایداری ویبل می‌گردد [۲]. ناپایداری ویبل یک ناپایداری الکترومغناطیسی است که در حقیقت مسئول اختلال میدانهای الکترومغناطیسی در حضور ناهمسانگردی فضای سرعت (ناهمسانگردی دمایی) است [۳ و ۴]. این ناپایداریها می‌توانند بر روی تعدیل انرژی بیم تأثیر گذاشته و منجر به گرمایش غیر عادی در سیستم گردند، از اینرو، در مطالعه طرح‌های اشتعال سریع در زمینه هدایت مغناطیسی ذرات پرنرژی به قلب سوخت به شدت مورد توجه می‌باشند. با فشردن سازی و افزایش تراکم، فواصل میانگین بین ذرات بتدریج کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ذرات زمان بیشتری را برای برهمکنش با هم صرف می‌کنند. تحت این شرایط، انرژی میانگین برهمکنش بین ذره‌ای افزایش می‌یابد و زمانیکه این انرژی قابل قیاس با میانگین انرژی جنبشی حرکت حرارتی ذرات می‌گردد پلاسما تبدیل به یک پلاسما غیرایده‌آل و اصطلاحاً پلاسمایی با جفت‌شدگی قوی می‌شود که در این شرایط اگر پلاسما کاملاً یونیده باشد، برهمکنش‌های کولنی حائز اهمیت خواهند بود. در این تحقیق سعی شده است تا با توجه به نقش مهم برخورد‌های کولنی به عنوان یک مکانیزم اساسی جذب تابش‌های الکترومغناطیسی فرکانس بالا بوسیله پلاسمایی کاملاً یونیده، نرخ رشد ناپایداری ویبل در یکپلاسما با جفت‌شدگی قوی مورد مطالعه قرار بگیرد. فرمالیزم اساسی بر پایه خطی‌سازی معادلات بولتزمن \_ ماکسول و استفاده از دو نوع توابع توزیع ناهمسانگرد حاکم بر سیستم بیم \_ پلاسما در فضای سرعت است.

### مدل محاسباتی

از جمله خصوصیات پلاسماهای با جفت‌شدگی قوی، سرد و چگال بودنشان در محدوده طول دمای است. تقریب پلاسمای سرد (که عمدتاً با استفاده از معادلات سیال قابل استخراج خواهد بود) تنها برای امواج فرکانس بالا مناسب است و عموماً ایجاب می‌کند، سرعت فاز موج بسیار بزرگتر از سرعت حرارتی باشد، در حقیقت فشار پلاسما و جذب باید قابل صرف‌نظر باشد. این در حالی است که اگر فرکانس موج پایین باشد (همانند امواج ناپایدار ویبل) اثرات حرارتی نیز باید در نظر گرفته شوند که از دیدگاه سیالی این به معنای در نظر گرفتن فشار پلاسما



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

است. پس از خطی سازی معادلات حالت و پیوستگی، مشخص می شود کمیت فوق تنها برای امواج طولی دارای کاربرد است. با توجه به اینکه هدف ما تنها مطالعه امواج ناپایدار ویبل عرضی به کمک تئوری جنبشی و به دور از هرگونه جفت شدگی با سایر ناپایداریهای مهمی همچون فیلامنشن است، فرمالیزم اصلی محاسبات تنها بر پایه خطی سازی معادله بولتزمنامواج الکترومغناطیسی عرضی به کمک معادلات ماکسول است:

با فرض عدم وجود میدانهای الکترومغناطیسی محیطی،  $q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$  نیروی لورنتس ناشی از میدانهای الکترومغناطیسی اختلالی است.  $f$  تابع توزیع کل، مجموعی از تابع توزیع تعادلی  $f_0$  تابع توزیع اختلالی  $f_1$  حاکم بر

$$u_{ei} = \frac{z e^2 n_i}{\sqrt{3} \pi \epsilon_0 m_e \theta_x \theta_y} \ln \Lambda$$

الکترونها در فضای سرعت است.  $\ln \Lambda$

میان یونها و الکترونها پس زمینه است.

لازمه محاسبه نرخ رشد ناپایداری شناخت تابع توزیع حاکم بر سیستم است. با توجه به آنچه که در مقدمه به

آن اشاره شده است، دو نوع توابع توزیع حاکم بر سیستم بیم \_ پلاسما، با فرض غیرنسبیتی بودن الکترونها زمینه و ساکن بودن یونها عبارتند از [5]:

$f_0(p_x)$



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۱۷ و ۱۸ فروردین ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جملات آغازین و ثانویه در هر یک از توابع توزیع بترتیب بیانگر توزیعات حاکم بر الکترونهاى غیر نسبیتی پلازما و الکترونهاى نسبیتی بیم هستند، جاییکه  $\gamma$  فاکتور جرم نسبیتی و کمیت های  $\theta_{x,y}^{p(b)}$  و  $p_{x,y}$  بترتیب بیانگر مؤلفه‌های دمایی الکترونهاى پلازما (بیم) و تکانه‌های الکترونی موازی با هریک از راستاهای  $x$  و  $y$  محور تقارن می‌باشند (راستای انتشار در راستای محور  $y$  است).  $p_d^{p(b)}$  به عنوان تکانه‌های drift الکترونهاى پلازما (بیم) (عامل ناهمسانگردی در فضای سرعت)، به کمک دانسیته‌های الکترونی بیم و پلازما بصورت  $p_d^p = p_d^b \frac{n_b}{\gamma n_p}$  به یکدیگر مرتبط خواهند بود.

پس از خطی‌سازی معادله بولتزمن به کمک معادلات ماکسول و نیز جایگذاری هر یک از توابع توزیع معرفی شده در رابطه حاصل، روابط پاشندگی برای هریک از توزیعات بصورت زیر بدست می‌آید:

For Bi-Maxwellian Distribution

For Delta-Like Distribution



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

$$\omega(x_i = \eta, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y e^{-\frac{y^2}{2(y-x_i)}}}{(y-x_i)} \text{ تابع } B' = \frac{p_a^2 / m\gamma}{\theta_y^b} \text{ و } B = \frac{\theta_x^b + p_a^2 / \gamma m}{\theta_y^b}, A = \frac{\theta_x^b + p_a^2 / m}{\theta_y^b} \text{ جاییکه}$$

$$\text{معرف تابع پاشندگی پلاسما با } \gamma = \frac{py}{m\theta_y^b} \text{ برای } \xi = \frac{\omega'}{k\sqrt{\theta_y^p/m}} \text{ و } \eta = \frac{\omega}{k\sqrt{\theta_y^b/\gamma m}} \text{ برای } \gamma \text{ است. کمیت}$$

$\omega'$  مجموعه‌ای از فرکانس موج و فرکانس برخورد در صفحه مختلط است.

نرخ رشد ناپایداری ویبل برابر با قسمت موهومی فرکانس موج یعنی  $\text{Im}\omega = \delta$  است که از رابطه پاشندگی

قابل استخراج است، پیش از آن باید توجه داشت؛ امواج ناپایدار ویبل امواجی فرکانس پایین هستند بنابراین با

معرفی شرایط حدی  $|\xi| \ll 1$  و  $|\eta| \ll 1$  و نیز صرف نظر از  $\omega^2$  در مقابل  $k^2 c^2$ ، نرخ رشد بصورت زیر بدست

خواهد آمد:

$$\mu^* = \eta^* = 1 - \sqrt{\frac{\pi(A-1)v_{ei}/kv_y^p}{A+(B-1)\frac{\omega_{be}}{\omega_{pe}}}} \text{ جاییکه } \mu'^* = \mu^* - B' \frac{\omega_{be}}{\omega_{pe}} \eta'^* = \eta^* - \sqrt{\frac{\pi(A-1)v_{ei}/kv_y^p}{\mu^{*2}}} B' \frac{\omega_{be}}{\omega_{pe}}$$

$$A + (B-1) \frac{\omega_b}{\omega_p}$$

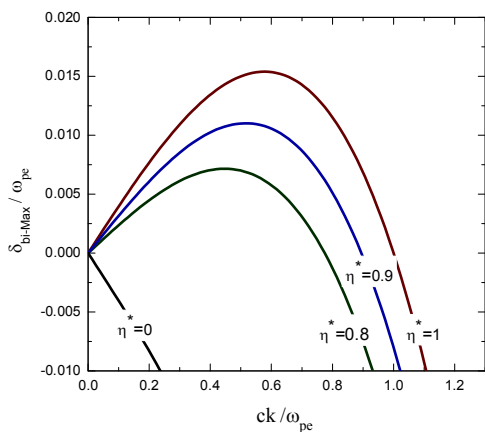
نتیجه گیری



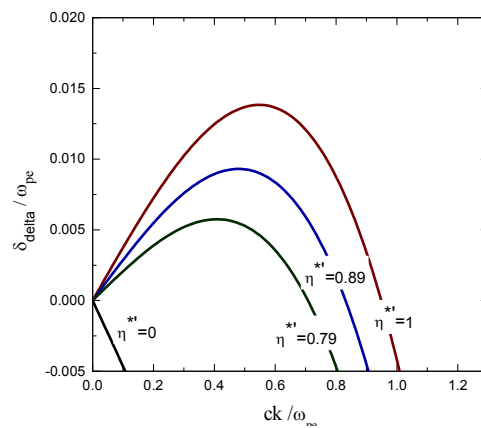
# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

هدف از این تحقیق ارائه نرخ رشد ناپایداری ویبل الکترونی در یک پلاسمای همجوشی جفت‌شدگی قوی با استفاده از دو نوع متمایز تابع توزیع حاکم بر الکترونهاى سیستم به کمک تئوری جنبشی است. تعریف جفت‌شدگی



شکل ۱-ب: منحنی تغییرات نرخ رشد نرمالیزه شده  $\frac{\delta_{bi-Max}}{\omega_{pe}}$  بر حسب  $\frac{ck}{\omega_{pe}}$  در حد  $\mu^* = 2$  برای مقادیر مختلف  $\eta^*$



شکل ۱-الف: منحنی تغییرات نرخ رشد نرمالیزه شده  $\frac{\delta_{delta}}{\omega_{pe}}$  بر حسب  $\frac{ck}{\omega_{pe}}$  در حد  $\mu^* = 1/9$  برای مقادیر مختلف  $\eta^*$

قوی ایجاب می‌کند، برخوردها کولنی سهمی حائز اهمیت در پلاسمای زمینه داشته باشند بطوریکه صرف نظر از آنها چندان قابل قبول نخواهد بود. روابط حاصل نشان می‌دهند حضور برخوردهای کولنی موجب کاهش نرخ رشد ناپایداری در مقایسه با یک نمونه بدون برخورد می‌شود (شکل ۱) و با کاهش هر چه بیشتر دمای پلاسما (متناسب با افزایش فرکانس برخورد) با کاهش بیشتر در نرخ رشد روبرو خواهیم بود. روابط بدست آمده نشان می‌دهند، شکل تابع توزیع حاکم بر سیستم بی‌تأثیر در میزان کاهش نرخ رشد نخواهد بود. مشاهده می‌شود، میزان کاهش نرخ رشد در تابع توزیع Delta-Like بیشتر از توزیع Bi\_Maxwellian است (شکل ۱-الف و ۱-ب) که این مسئله به خوبی در تعاریف ارائه شده برای کمیت‌های  $\eta^*$  و  $\mu^*$  قابل مشاهده است.

مراجع



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [1] C. Deutsch, Penetration of intense charged particle beams in the outer layers of precompressed thermonuclear fuels, *Laser and Particle Beams*, 22, 02, 115-120, 2004.
- [2] S. Atzeni and J. Meyer-Ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion*, Clarendon Press, Oxford, 423, 2004.
- [3] E. S. Weibel, Spontaneously growing transverse waves in a plasma due to an anisotropic velocity distribution, *Physical Review Letters*, 2, 3, 83-84, 1959.
- [4] M. Mahdavi and H. Khanzadeh, Collisional effect on the Weibel instability with the bi-Maxwellian distribution function, *Physics of Plasmas*, 20, 5, 052114, 2013.
- [5] C. Deutsch, A. Bret, M. C. Firpo, L. Gremillrt, E. Lefebvre and A. Lifscitz, Onset of coherent electromagnetic structures in the relativistic electron beam deuterium-tritium fuel interaction of fast ignition concern, *Laser and Particle Beams*, 26, 02, 157-165, 2008.