بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

# مسیر و سرعت الکترون در ویگلر پلاسمایی

**راضیه مهذبیه، بهنام بهادری**

گروه اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

mohazabyeh@gmail.com

چکیده- از بلور پلاسمای پیچیده به عنوان ویگلر الکتروستاتیک در لیزر الکترون آزاد استفاده شده است. مزیت طرح، فاصله کم دانه‌های بلور نسبت به آهنرباهای معمول است که منجر به کاهش طول موج لیزر می‌شود. تعداد ردیف‌ها و در واقع اندازه بلورهای پلاسمایی تغییر داده شده و مسیر و سرعت حرکت الکترون نسبیتی در حال عبور از چنین ویگلرهای پلاسمایی به دست آمده است. حرکت الکترون نوسانی است و افزایش سرعت اولیه الکترون فرودی یعنی افزایش انرژی، منجر به کاهش دامنه مسیر و همچنین کاهش دامنه سرعت عرضی الکترون می‌شود.

کلید واژه- پلاسمای پیچیده، مسیر و سرعت الکترون، ویگلر پلاسمایی

# Trajectory and velocity of electron in plasma wiggler

**R. Mohazabyeh; B. Bahadory**

**Atomic and Molecular Department, Physics Faculty, Yazd University, Yazd, Iran**

Abstract- Complex plasma crystal is used as electrostatic wiggler in the free electron laser (FEL). Distances between grains are smaller relative to distances between usual magnets, so laser wavelength reduces with plasma wigglers. Trajectory and velocity of relativistic electron passing through the plasma crystal is obtained. The electron oscillates and increasing of the initial energy of injected electron leads to decreasing of amplitude of both trajectory and transverse velocity of the electron.

Keywords: complex plasma, trajectory and velocity of electron, plasma wiggler

## مقدمه

پلاسما گاز شبه خنثی‌ای از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهند [۱]. پلاسمای پیچیده یا پلاسمای غباری،گاز یونیزه شده حاوی دانه‌ها یا ذرات غبار با اندازه‌هایی از مرتبه میکرومتر است. البته پلاسماهای فضایی متفاوتند و دانه‌های بزرگتر هم دارند [۲و۳]. شکل‌گیری بلور درون محیط پلاسمایی برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط دو گروه مستقل و با فاصله زمانی کم مشاهده شد [۴و۵]. تشکیل شبکه‌های منظم در دمای اتاق و قابل مشاهده با چشم غیر مسلح، از ویژگی‌های منحصر به فرد بلور پلاسمای پیچیده است. ویژگی میان‌ذره‌ای بودن سیستم هم مزید بر علت شده و اغلب از بلور پلاسمایی، علاوه بر پلاسما برای مطالعه‌های بنیادین در زمینه‌های مختلفی چون شکل‌گیری و ذوب بلور، تعیین نیروی برهمکنشی بین ذره‌ها، بهبود عملکرد دستگاه‌های همجوشی هسته‌ای، فیزیک فضا، انتشار موج و سالیتون،



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

ترمودینامیک سیستم‌های غیر تعادلی و اتلافی و ... استفاده می‌شود [۱۴-۶].

به نظر، بار بنیادی‌ترین و اصلی‌ترین خاصیت دانه‌ها است. دانه‌ها بر اثر عوامل گوناگونی از قبیل جذب الکترون، جذب یون، گسیل الکترون ثانویه، فتوالکتریک و رادیواکتیویته باردار می‌شوند. در محیط‌های آزمایشگاهی که ما آنها را در نظر می‌گیریم، دو پدیده اول یعنی جذب الکترون و یون فرایندهای غالب هستند. دانه‌ها به سبب سرعت بیشتر الکترون‌ها نسبت به یون‌ها، به صورت منفی باردار می‌شوند. سپس اطراف آنها ذرات مثبت قرار می‌گیرند و مانند پلاسماهای معمولی، حفاظ دبای رخ می‌دهد. دانه‌ها به خاطر تعادل بین نیروی رو به پایین گرانش و نیروی رو به بالای میدان الکتریکی قوی ناشی از الکترود درون محفظه به حالت تعلیق در می‌آیند و معمولا شبکه دو بعدی شکل می‌گیرد [۲و۳]. ما در کارمان از بلورهای دو بعدی استفاده کرده‌ایم.

## بلور پلاسمایی به عنوان ویگلر

در لیزر الکترون آزاد، آهنرباهای با قطب مخالف به نحوی در کنار یکدیگر چیده می‌شوند که میدان متناوبی معروف به ویگلر را شکل می‌دهند. ویگلرهای الکتروستاتیک نیز وجود دارند و گرچه کمتر به کار برده شده‌اند، هدف همان حرکت تناوبی الکترون عبوری از درون ویگلر است. این امر اساس کار لیزر الکترون آزاد است و طول موج لیزر خروجی با فاصله تناوب حرکت نوسانی الکترون یعنی طول موج ویگلر رابطه مستقیم دارد. در اینجا دانه‌های باردار بلور طوری هستند که میدان الکتریکی متناوب تولید می‌کنند. در ویگلرهای مرسوم فاصله آهنرباها تعیین کننده طول موج ویگلر است و در ویگلر پلاسمایی، فاصله دانه‌ها این نقش را برعهده دارد. مزیت اصلی استفاده از بلور پلاسمایی به عنوان ویگلر این است که طول موج لیزر خروجی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. دلیل این مطلب فاصله دانه‌ها است که از مرتبه میلی‌متر یا کمتر هستند در حالی که فاصله آهنرباهای موجود در بهترین حالت از مرتبه سانتی‌متر است [۱۵].

بلورهای پلاسمایی در نوع‌های مختلفی شکل می‌گیرند. در مرجع [۱۵] عبور الکترون از بلور پلاسمایی شش‌گوشه بررسی شده است. در کار حاضر بلور با فاصله‌های طولی و عرضی مساوی را بررسی می‌کنیم. بلورهای مختلف و خواص آنها به خصوص میدان الکتریکی‌شان مفصلا در مرجع‌های [۱۸-۱۶] تولید و آنالیز شده‌اند. بلورهای مورد استفاده در مقاله حاضر هم از جمله بلورهای بررسی و شبیه‌سازی شده در کارهای گذشته هست.

## معادله نیرو

شرط تشکیل بلور با

$$\Gamma = \frac{q^2}{rk_BT} exp(-\frac{r}{\lambda_D}) \qquad (۱)$$

بیان می‌شود که در آن $k_B$ ثابت بولتزمن، $T$ دمای دانه‌ها، $r$ فاصله بین دانه‌ها، $q$ بار دانه و $\lambda_D$ طول دبای سیستم است [۳]. صورت کسر انرژی پتانسیل و مخرج آن انرژی گرمایی است؛ $\Gamma$ی بیشتر یعنی همبستگی بیشتر دانه‌ها و هرچه مقدار $\Gamma$زیادتر باشد، بلور مستحکم‌تر است.

در حالت تعادل، باری که به دانه‌ها می‌رسد ثابت است لذا $\Sigma I_l = dq_l/dt = 0$. در این رابطه جمع‌بندی روی گونه‌های مختلف -در اینجا الکترون‌ها و یون‌ها- انجام می‌شود. با مشخص شدن بار، پتانسیل الکتریکی که خارج از طول دبای به صورت کولنی استتار شده است، مشخص می‌شود.

مقدار میدان الکتریکی یک دانه (با محاسبه منفی گرادیان پتانسیل) به شکل زیر است [۲]:



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

$$E = \frac{q}{r^2}\left(1+\frac{r}{\lambda_D}\right)exp(-\frac{r}{\lambda_D}) \qquad (۲)$$

با برهم‌نهی، اثر نیروهای همه دانه‌ها روی الکترون به این صورت در می‌آید:

$$F = q^2 \sum_{j=1}^{n} \frac{r_e - r_j}{r_{ej}^3}\left(1+\frac{r_{ej}}{\lambda_D}\right) exp\left(\frac{-r_{ej}}{\lambda_D}\right) \qquad (۳)$$

که در آن $n$ تعداد دانه‌ها و

$$r_{ej} = |\boldsymbol{r_e} - \boldsymbol{r_j}| \qquad (۴)$$

فاصله هر دانه از الکترون است.

نیروی فوق در دو بعد روی الکترون نسبیتی اعمال می‌شود. شکل نسبیتی قانون دوم نیوتن در مساله ما عبارتست از:

$$F_e = m_e v_e \frac{d\gamma}{dt} + m_e \gamma \frac{dv_e}{dt} \qquad (۵)$$

$m_e$ جرم سکون الکترون، $v_e$ سرعت الکترون و $\gamma$ عامل نسبیتی است. معادله‌های فوق را با کامپیوتر حل کردیم تا حرکت الکترون شبیه‌سازی شود. لازم به ذکر است اثر الکترون روی شبکه ناچیز و قابل صرفنظر است. این مطلب که در برنامه دیده شده، از جرم زیاد دانه‌ها نسبت به الکترون قابل درک است.

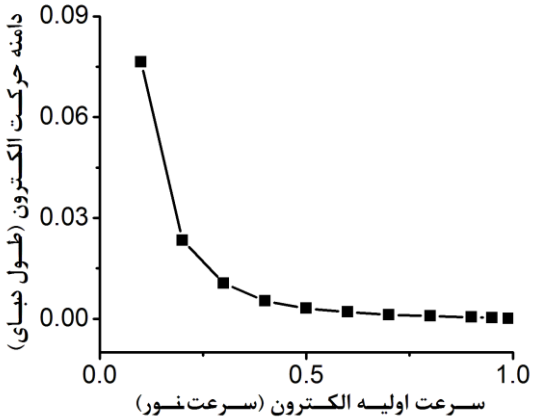
در شبیه‌سازی جرم‌ها به جرم الکترون، بارها به بار الکترون، فاصله‌ها به طول دبای و سرعت‌ها به سرعت نور بهنجار شده‌اند.

## عبور الکترون از بلور

چندین عامل در لیزر الکترون آزاد وجود دارند که بهره لیزر به آنها بستگی دارد. از جمله این پارامترها باید انرژی الکترون، شکل و نوع میدان مغناطیسی یا الکتریکی، طول موج ویگلر و سرعت عرضی الکترون را نام برد. انرژی بیشتر الکترون، طول موج ویگلر کمتر و سرعت عرضی بیشتر مطلوب‌تر است چون به بهره بیشتر می‌انجامد[۱۵].

در شبیه‌سازی به بررسی موقعیت مکانی و سرعت عرضی الکترون پرداخته‌ایم و اثر سرعت اولیه الکترون فرودی روی آنها را سنجیده‌ایم. ابتدا بلور پلاسمایی با ده ردیف که هر ردیف شامل ده دانه با بار $q = 1000\,e$ است را انتخاب کردیم. سپس بلور دو ردیفی با همین مشخصات تشکیل داده و میدان‌های الکتریکی طولی و عرضی بلور و مکان و سرعت عرضی الکترون را محاسبه کردیم. تا دقت محاسباتی ما یعنی ده رقم با معنا، جواب‌ها برای هر دو بلور یکسان است. این موضوع غیر منطقی نیست و با توجه به رابطه میدان الکتریکی (۲) که افت نمایی و کولنی دارد، قابل درک است. لذا نتایج زیر که برای بلور با اندازه‌های مختلف قابل استفاده است.

مطابق انتظار، ویگلر پلاسمایی موجب شد حرکت الکترون منظم و سینوسی شود. بسته به شرایط تزریق الکترون مشخصا مکان اولیه، گاهی حرکت یک حرکت عرضی هم به حرکت اصلی سینوسی اضافه می‌شود. مشاهده شد که تزریق قبل از بلور و بعد از بلور مهم نیست و صرفا وجود یک دانه (که بار منفی دارد) درست در زیر الکترون یا نزدیکی آن موجب حرکت عرضی رو به بالا و وجود یک دانه درست بالای الکترون یا نزدیکی آن موجب حرکت رو به پایین می‌شود. برای داشتن لیزر خوب، نوسان یکدست نیاز است که در همه حالت‌ها برقرار است.




شکل ۱: نمودار تغییرات دامنه حرکت الکترون با سرعت‌های اولیه متفاوت.

دامنه حرکت الکترون به ازای سرعت‌های اولیه متفاوت، محاسبه و در شکل ۱ رسم شده است. دیده می‌شود که در سرعت‌های بالاتر، دامنه حرکت الکترون محدودتر می‌شود.

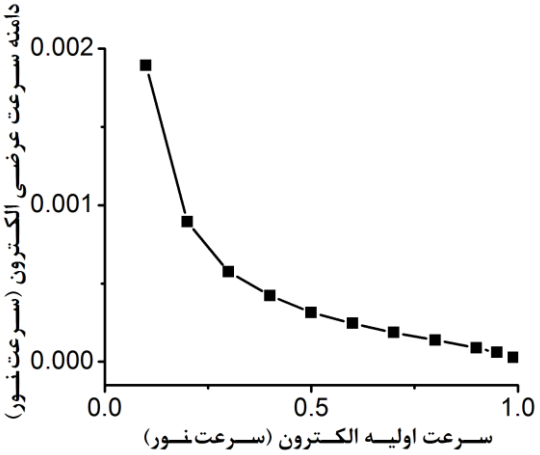


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

سرعت عرضی الکترون نیز مانند نمودار حرکت الکترون سینوسی است. دامنه سرعت عرضی الکترون به ازای سرعت‌های اولیه متفاوت در شکل ۲ آورده شده است. برای به دست آمدن هر نقطه نمودارها، برنامه شبیه‌سازی باید با ورودی متفاوت اجرا شود و این جدای میانگین‌گیری برای هر نقطه است. شکل ۲ می‌گوید با افزایش انرژی الکترون فرودی، از سرعت عرضی کاسته می‌شود.

نوع بلور تفاوت کرده، با این حال نتیجه‌ها مشابه با کارهای قبلی از جمله مرجع [۱۵] است. این یعنی ویگلر پلاسمایی محدود به بلور شش‌گوشه نیست.




شکل ۲: نمودار تغییرات دامنه سرعت عرضی الکترون با سرعت‌های اولیه متفاوت.

## مرجع‌ها

[۱] *ف. چن، ص. سبحانیان (مترجم)، مقدمه‌ای بر فیزیک پلاسما و هم‌جوشی کنترل‌شده، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۱.*

[2] S. V. Vladimirov, K. Ostrikov and A. A. Samarian, “Physics and applications of complex plasmas” World Scientific, 2005.

[3] V. N. Tsytovich, G. Morfill, S. V. Vladimirov and H. M. Thomas, “Elementary physics of complex plasmas”, Springer Science & Business Media, Vol. 731, 2008.

[4] J. H. Chu and L. I, “Direct Observation of Coulomb Crystals and Liquids in Strongly Coupled rf Dusty Plasmas” Phys. Rev. Lett., Vol. 72, 4009–4012 1994.

[5] H. Thomas, G. E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher and D. Möhlmann, “Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma” Phys. Rev. Lett., Vol. 73, 652, 1994.

[6] M. Horányi and T. E. Cravens, “The structure and dynamics of Jupiter's ring”, Nature, Vol. 381, 6580, 1996.

[7] J. Winter and G. Gebauer, “Dust in magnetic confinement fusion devices and its impact on plasma operation.” J. Nucl. Material, Vol. 266, 228-233, 1999.

[8] L. Boufendi and A. Bouchoule, “Particle nucleation and growth in a low-pressure argon-silane discharge” Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 3, 262, 1994.

[9] V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak and G. E. Morfill, “Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives” Phys. Rep., Vol. 421, 1-103, 2005.

[10] V. Massereau-Guilbaud, I. Géraud-Grenier, J. F. Lagrange, H. Tawidian and M. Mikikian, “Electron temperature evolution in a low-pressure dusty RF nitrogen-rich methane plasma” IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 41, 816-821, 2013.

[11] K. Avinash, “Mean-field theory of critical phenomenon for mutually repelling particles in complex plasmas” Phys. Rev. Lett., Vol. 98, 095003 2007.

[12] B. Liu, J. Goree and Y. Feng, “Non-Gaussian statistics and superdiffusion in a driven-dissipative dusty plasma” Phys. Rev. E, Vol. 78, 046403, 2008.

[13] V. Nosenko, G. E. Morfill and P. Rosakis, “Direct experimental measurement of the speed-stress relation for dislocations in a plasma crystal” Phys. Rev. Lett. Vol. 106, 155002, 2011.

[14] Y. Feng, J. Goree and B. Liu, “Evolution of shear-induced melting in a dusty plasma” Phys. Rev. Lett., Vol. 104, 165003, 2010.

[15] S. Mirzanejhad and B. Bahadory, “Two-dimensional dusty plasma crystal as an electrostatic wiggler for free-electron laser” Phys. Plasmas, Vol. 14, 043101, 2007.

[۱۶] *ر. ز. مهذبیه، ب. بهادری، بلور پلاسمای پیچیده با ساختارهای راستگوشه، کنفرانس فیزیک ایران، مشهد ۱۳۹۴.*

[۱۷] *ر. ز. مهذبیه، ب. بهادری، میدان الکتریکی در بلور پلاسمای پیچیده، کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، یزد، ۱۳۹۵.*

[۱۸] *ر. ز. مهذبیه، ب. بهادری، میدان الکتریکی در بلور پلاسمای پیچیده غیرایده‌آل، کنفرانس فیزیک ایران، شیراز، ۱۳۹۵.*



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]