

ارزیابی محاسباتی گرمایش پلاسماهای گداخت با استفاده از امواج دامنه بلند در گستره- ی بسامد رادیویی در رژیم غیر خطی

پقه، صالح*، علی عسگریان، محمد - مستجاب‌الدعواتی، مجتبی

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله استفاده از تبدیل مد مستقیم XB با استفاده از کد XOOPIC در توکامک کروی NSTX برای حالتی که در آن دامنه موج ورودی 10^4-10^6 V/m و بسامد موج ورودی 15 GHz می‌باشد، بررسی و شبیه‌سازی شده است؛ با توجه به نتایج شبیه‌سازی، با افزایش دامنه‌ی امواج فرودی، میزان برانگیختگی امواج برنشتاین در هماهنگی-های سیکلوترونی الکترون کاهش می‌یابد و بدین ترتیب فرصت گرمایش پلاسما با امواج برنشتاین الکترونی در مرکز کم می‌شود.

کلمات کلیدی: گرمایش پلاسما، امواج برنشتاین، تبدیل موج، ناپایداری پارامتریک

مقدمه :

انرژی گداخت هسته‌ای یکی از فناوری‌های بالقوه برای تامین انرژی در آینده‌ای نه چندان دور است. مطالعات بسیاری برای تحقق این هدف، در مباحث نظری و نیز بحث فناوری در حال انجام است، از جمله این پژوهش‌ها می‌توان تحقیقات مربوط به گرمایش پلاسما برای مقابله با اثرات گسیختگی پلاسما اشاره کرد [۱-۶]، در سال‌های اخیر به دلیل محدودیت‌های فناوری، بحث گرمایش بیشتر روی گرمایش اهمی، تزریق باریکه خشی و امواج الکترومغناطیس یونی بوده است. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در منابع رایو بسامد توان بالا در گستره‌ی چند ۱۰ و چند ۱۰۰ گیگاهرتز، تلاش‌ها به گرمایش با امواج الکترونی سوق پیدا کرده است [۷]، نمونه‌هایی از این مطالعات روی تکامک‌های بزرگ در حال افزایش است [۵-۶]. چنین رویکردی در مقایسه با رهیافت‌های پیشین، امکان قرارگیری منبع گرمایش را در فاصله‌ای دورتر از دستگاه گداخت فراهم می‌کند. امواج الکترونی از طریق برانگیزش امواج الکترواستاتیک برنشتاین در محیط پلاسمایی داغ باعث انتقال انرژی از طریق تشدید سیکلوترونی الکترون می‌شوند و نشان داده شده است که امواج سیکلوترونی الکترونی به طور مؤثر، پلاسماهای استرلیتر و توکامک را گرم می‌کنند [۸]. متأسفانه از آنجایی که در پلاسماهای چگال نواحی تشدید دورگه بالایی و قطع‌ها، به لبه پلاسما بسیار نزدیک هستند، کاربرد این امواج در گرم کردن پلاسما چگال، محدود می‌شود و در نتیجه امواج الکترومغناطیسی قادر به نفوذ به نواحی درونی پلاسما نیستند. به طور ویژه کاربرد امواج سیکلوترونی در پلاسماهای توکامک کروی که میدان

مغناطیسی نسبتاً پایین و چگالی بسیار بالا دارد، پیچیده و سخت می‌شود. تنها راه گذر از این مشکل، استفاده از ترفند تبدیل خطی موج الکترومغناطیسی ورودی به یک موج برنشتاین الکترونی (EBW) در ناحیه UHR است. برای EBW محدودیت چگالی وجود ندارد و به طور کلی توان تزریقی قابلیت انتقال به عمق پلاسما را دارد. انتشار موج در UHR در جایی که میدان الکتریکی موج افزایش می‌یابد، معمولاً با یک ناپایداری واپاشی پارامتری همراه است که این ناپایداری منجر به برانگیختگی دو موج دیگر می‌شود: یکی از این امواج به سمت عقب پراکنده شده و دارای بسامد کمتری نسبت به موج فرودی است و دیگری موجی با بسامد پائین می‌باشد. این امواج بسامد پائین که با عنوان امواج دورگه پائینی (LHWها) شناخته می‌شوند، تنها امواجی هستند که قادر به رسیدن به مقیاس‌های کوچک موج UH پمپ هستند و شرط تطبیق عدد موج را برای ناپایداری واپاشی برآورده می‌سازند.

نظریه ناپایداری پس پراکنش القائی در لایه UHR با تولید امواج LH همراه است. این ناپایداری منجر به بازتاب توان گرمایش می‌شود و ترابری آن به سمت عقب و به بیرون پلاسما از طریق تبدیل وارون EBW به امواج EC الکترومغناطیسی، یک فرآیند تخریبی است.

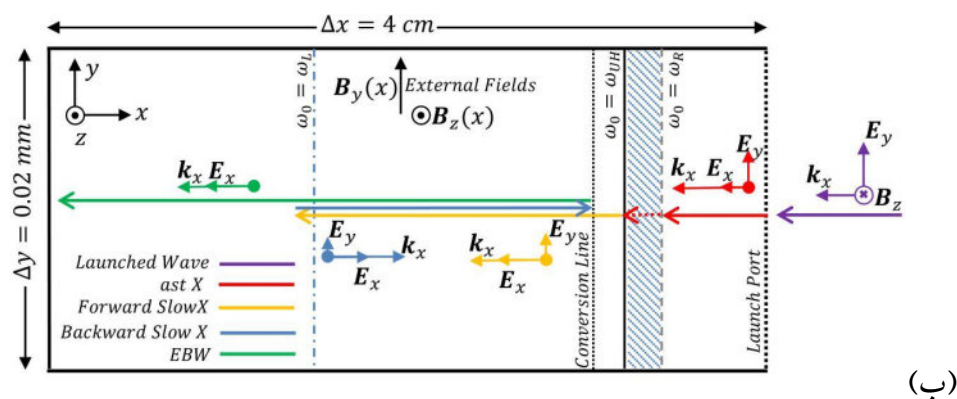
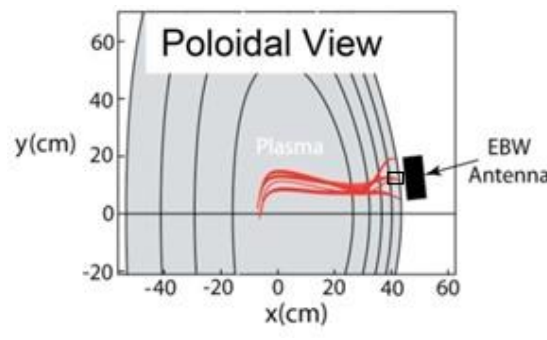
با در نظر گرفتن این که عدد موج امواج UH پمپ و دختر منتشر شده در عرض سطح UHR به سرعت افزایش می‌یابد، فرآیند واپاشی در ناحیه باریکی از UHR جای می‌گیرد، بنابراین می‌توان از هندسه‌ی پیچیدی پلاسما متعادل چشم‌پوشی کرد و برای شبیه‌سازی می‌توان از مدل پلاسما تیغه‌ای بهره گرفت. در حالت کلی، توصیف تحلیلی رژیم غیرخطی مقدور نیست، بنابراین بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی عددی در مقوله‌ی اثرات غیرخطی، راهکاری اجتناب‌ناپذیر است. اخیراً شبیه‌سازی فرآیند گرمایش پلاسما با سازوکار تبدیل مد در رژیم‌های غیرخطی مورد توجه قرار گرفته است. روش جنبشی ذره-در-جعبه با در نظر گرفتن توصیف جنبشی ذرات پلاسما و مجموعه معادلات ماکسول، نقطه‌ی شروع این گونه مدل‌سازی‌ها بوده است.

م. علی‌عسگریان و همکاران، فرآیند تبدیل مد O-X، به عنوان گام اول در شبیه‌سازی تبدیل مد X-B برای فرآیند تبدیل مد دوگانه‌ی O-X-B، با مشخصه‌ی استلریاتور TJ-II را با استفاده از کد XOOPIC مطالعه کردند [۱۰]. در پژوهشی دیگر م. علی‌عسگریان و همکاران، برای نخستین بار فرآیند تبدیل مد مستقیم X-B را در رژیم غیرخطی، برای میدانی با دامنه‌ی بیشینه‌ی $E_0=10^5$ V/m برای مشخصه‌های توکامک کروی NSTX انجام داده‌اند [۱۱]. بررسی‌های ایشان نشان می‌دهد که در اثر حضور پدیده‌های غیرخطی، بازده تبدیل مد مستقیم X-B به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند و مقایسه با رژیم خطی، اثرات غیرخطی غالب است و طول موج و سرعت گروه امواج برنشتاین نسبت به رژیم خطی، به ترتیب افزایشی در حدود ۳۶ و ۱۷ درصد دارند. در مطالعه‌ی دیگر، م. عباسی و همکاران حضور نوسان‌های دامنه بلند پلاسما الکترونی، تحت عنوان مد جایگزیده‌ی دورگه‌ی بالایی را در رژیم گرمایش برنشتاین NSTX با به‌کارگیری امواج توان بالا اثبات کرده‌اند [۱۲]؛ در این بررسی، اندرکنش بین امواج برنشتاین با مد جایگزیده‌ی دورگه‌ی بالایی، باعث جابجایی

ناحیه‌ی تشدید می‌شود که در نتیجه‌ی آن بازده تبدیل مد تا حدود ۳۵ درصد کم می‌شود. آ. وی. آرفیو و همکاران نیز با الهام گرفتن از روش‌های ذره-در-جعبه‌ی ذکر شده، شبیه‌سازی جنبشی تبدیل مدهای O-X-B و X-B را با استفاده از کد EPOCH در رژیم خطی انجام داده‌اند [۱۳]. بررسی رژیم غیرخطی برانگیزش امواج برنشتین با امواج الکترومغناطیسی نیز با استفاده از هندسه در نظر گرفته شده در پژوهش ایشان، امکان‌پذیر است. در این مقاله استفاده از امواج رادیو بسامد با دامنه‌های بالا با استفاده از روش شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش کار:

در این پژوهش، ارزیابی اثرات غیرخطی امواج دامنه بلند رادیو بسامد در گرمایش و جریانش پلاسماهای گداخت، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی به کمک کدهای جنبشی ذره-در-جعبه XOOPIIC صورت گرفت. در رهیافت شبیه‌سازی جنبشی به روش ذره-در-جعبه در محیط پلاسما، از مجموعه معادلات ماکسول به همراه معادله لورنتس و روابط چگالی بار و جریان پلاسما استفاده می‌شود.

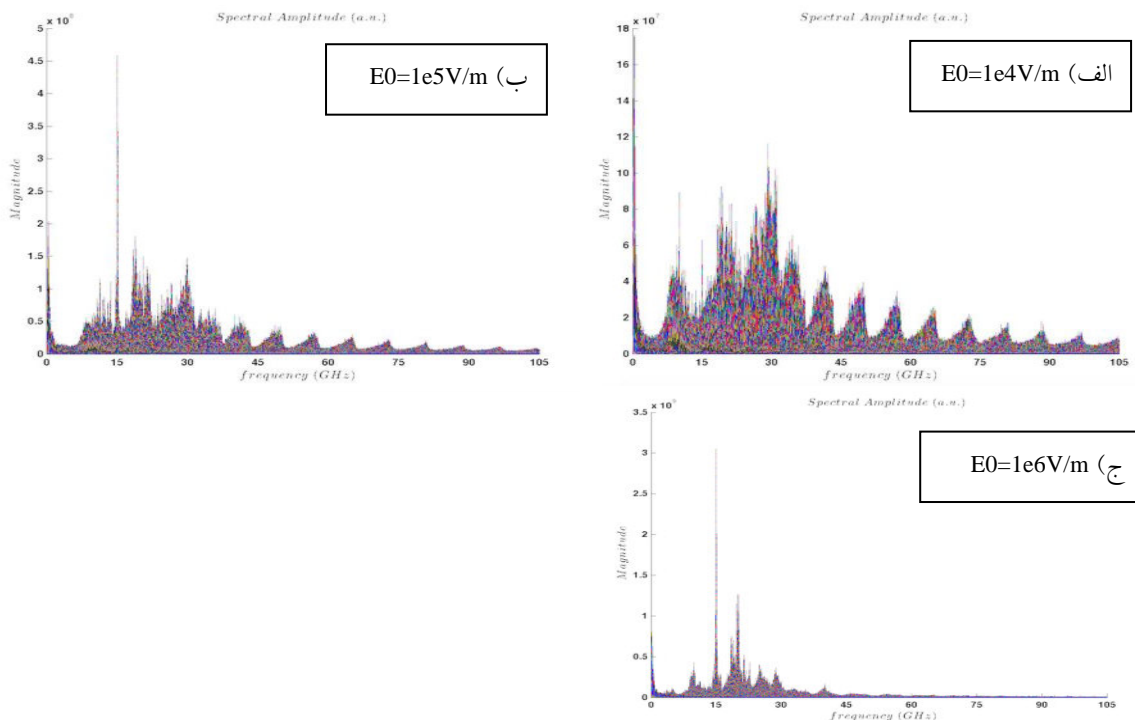


شکل ۱: (الف) توکامک کروی NSTX از نمای قطبی. (ب) توصیف هندسی و سمبلیک انتشار موج به داخل پلاسما در دستگاه مختصات تخت منطبق با ناحیه‌ی تعیین شده در شکل (الف).

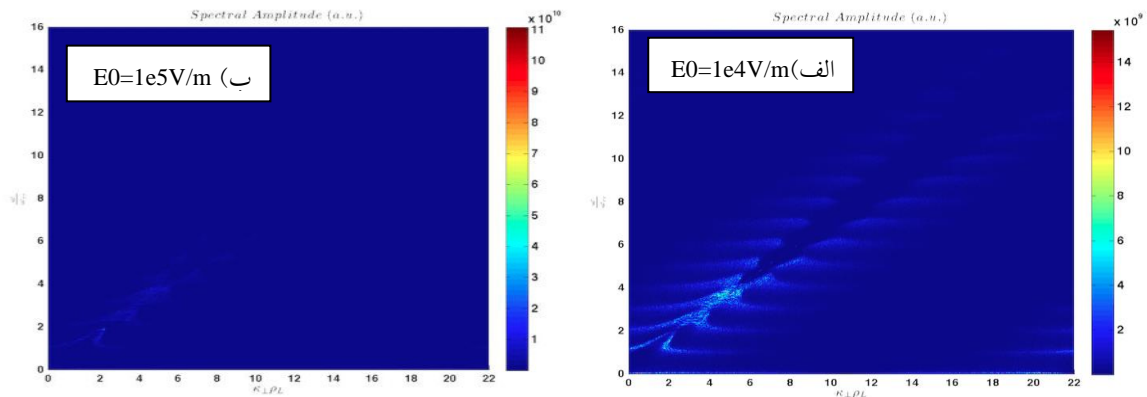
دستگاه مورد بررسی در این مقاله توکامک کروی NSTX-U واقع در آزمایشگاه فیزیک پلاسمای پرینستون (PPPL) است. میدانی مغناطیسی ثابت این توکامک ۰,۵ تسلا است که توسط سیم‌پیچ‌های ابررسانا ایجاد می‌شود و در نواحی نزدیک مرکز دستگاه بیشترین مقدار را دارد. پارامترهای مربوط به دستگاه عبارتند از: شعاع بزرگ ۱,۰۵ متر، شعاع کوچک ۰,۴۴ متر. چگالی بیشینه در مرکز پلازما $n_{e0} = 3 \times 10^{19} \text{ #/m}^3$ است. بر اساس شکل الف، هندسه سیستم شبیه‌سازی شده، در صفحه استوایی $y \approx 0$ قرار دارد و در راستای شعاعی x از $x_s = 0.40 \text{ m}$ شروع شده و به $x_f = a$ ختم می‌شود و در راستای قطبی y از $y_s = 0$ شروع شده و به $y_f = 0.02 \text{ mm}$ ختم می‌شود. راستای z به عنوان راستای حلقوی در نظر گرفته می‌شود. سیستم شبیه‌سازی شده با همه نواحی مهم که در برگیرنده مراحل مختلف تبدیل مد هستند در شکل اب نشان داده شده است. فرکانس موج فرودی برابر ۱۵ گیگاهرتز در نظر گرفته شده است.

نتایج:

نتایج حاصل از این مطالعه در شکل‌های ۲-۳ آورده شده است، همان گونه در شکل ۲ دیده می‌شود برخی از برانگیختگی امواج برنشتین مشهود است.

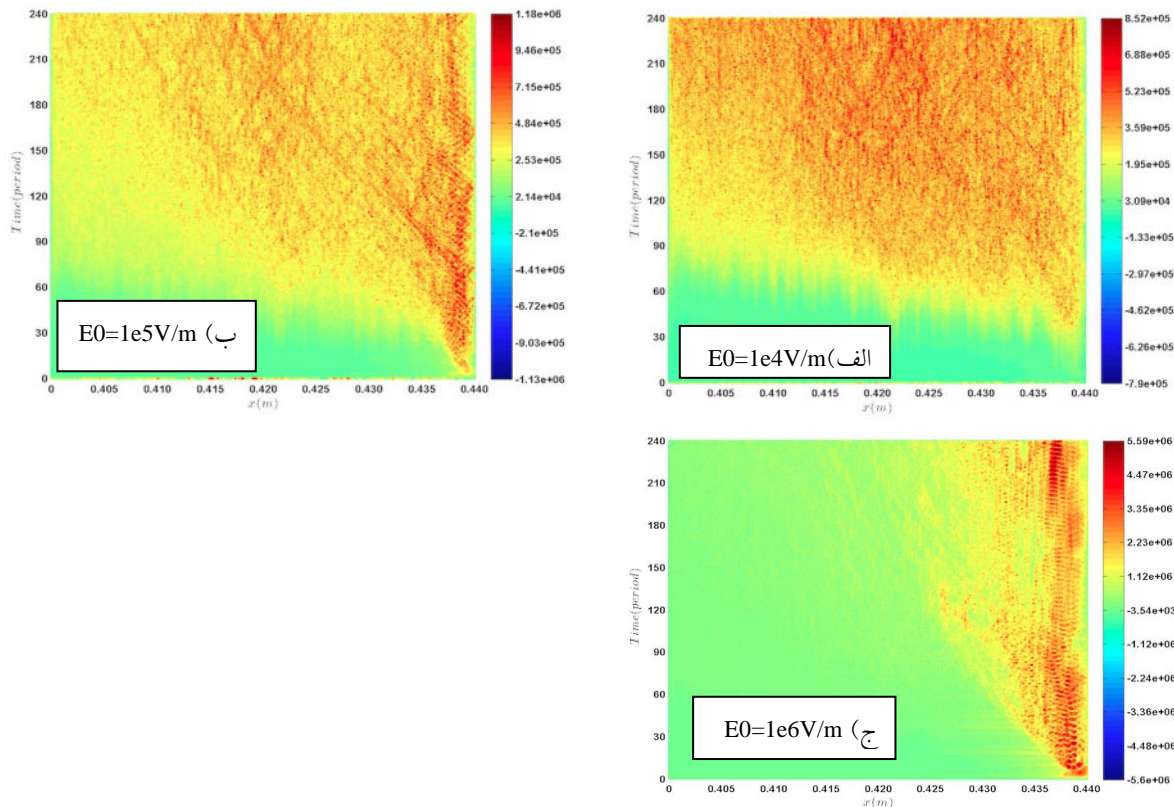


شکل ۳: نمودار اندازه طیف برای دامنه‌های مختلف موج فرودی (الف) $E_0 = 1e4 \text{ V/m}$ ، (ب) $E_0 = 1e5 \text{ V/m}$ و (ج) $E_0 = 1e6 \text{ V/m}$



شکل ۴: نمودار تبدیل فوری دو گانه طیفی برای دو دامنه موج فرودی الف ($E_0=1e4V$) و الف ($E_0=1e5V$)

از روی شکل ۲ و ۳ متوجه می‌شویم که میزان برانگیختگی امواج برنشتاین در دامنه پایین‌تر $E_0=1e4V$ نسبت به دامنه موج $E_0=1e5V$ بیشتر است و در این مورد هماهنگی‌های بالاتر سیکلوترونی نیز مشاهده می‌شود. در حالی که در دامنه $E_0=1e5V$ برانگیختگی هماهنگی‌های بالاتر مشاهده نمی‌شود. از این موضوع نتیجه می‌شود که با افزایش دامنه امواج بهره برانگیزش امواج برنشتاین کم می‌شود.



شکل ۵: نمودار میدان الکتریکی در راستای محور x بر حسب مکان برای دامنه‌های مختلف موج فرودی الف)

$E_0=1e4V/m$, $E_0=1e5V/m$ (ب) و $E_0=1e6V/m$ (ج)

همان گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود با افزایش دامنه موج فرودی، میزان نفوذ موج به سمت مرکز پلاسما، با افزایش دامنه آن کمتر شده است، توجه کنید که میزان جذب در حوالی مکان $X=0.438m$ بیشترین مقدار خود را دارد، این امر با توجه به حضور ناحیه تشدید دورگه بالایی، و با توجه به جذب تشدید امواج برنشتاین در اثر پدیده تبدیل موج، مورد انتظار است.

بحث و نتیجه گیری:

بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته نشان می‌دهد که افزایش دامنه موج فرودی، تعداد هارمونیک‌های کمتری برانگیخته می‌شوند. از سوی دیگر با افزایش دامنه میزان جذب در نواحی نزدیک به تشدید دورگه‌ی بالایی بیشتر بوده است. و با فاصله گرفتن از این ناحیه، میزان نفوذ موج به مرکز پلاسما کاهش یافته است.

مراجع:

1. V. Shevchenko, A. Saveliev, "Current Drive and Plasma Heating by Electron Bernstein Waves in MAST," AIP Conf. Proc. 1187, 457 (2009) 457-460.
2. D. W. Swain. M. D. Carter, "Plasma Heating and Current Drive Systems for the Fusion Ignition research experiment (FIRE)," Fusion Engineering and Design 63-64 (2002) 541-545.
3. J. Stober et. al., "High Power ECRH and ECCD in moderately collisional ASDEX Upgrade H-modes and status of EC system upgrade," EPJ Web of Conferences 87, 02004 (2015).
4. M. Preynas et. al., "Experimental characterization of plasma start-up using ECRH in preparation of W7-X operation," EPJ Web of Conferences 87, 02005 (2015).
5. V. F. Shevchenko et. al., "Long Pulse EBW Start-up Experiments in MAST," EPJ Web of Conferences 87, 02007 (2015).
6. G. Taylor, "A megawatt-level 28 GHz heating system for the National Spherical Torus Experiment Upgrade," EPJ Web of Conferences 87, 02013 (2015).
7. K. Flech, M. Blank, P. Borchard and S. Cauffman, "Recent Tests on 117.5 GHz and 170 GHz Gyrotrons," EPJ Web of Conferences 87, 04006 (2015).
8. H. P. Laqua, "Electron Bernstein Wave Heating and Diagnostic," *Plasma Phys. Control. Fusion* **49**, R1-R42 (2007).
9. V. F. Shevchenko, Y. F. Baranov, T. Bigelow, J. B. Caughman, S. Diem, C. Dukes, P. Finburg, J. Hawes, C. Gurl, J. Griffiths, J. Mailloux, M. Peng, A. N. Saveliev, Y. Takase, H. Tanaka, and G. Taylor, "Long Pulse EBW Start-Up Experiments in MAST," *EPJ Web of Conference* **87**, 02007 (2015).
10. M. Ali Asgarian, J. P. Verboncoeur, A. Parvazian, and R. Trines, "Kinetic Simulation of the O-X Conversion Process in Dense Magnetised Plasmas," *Phys. Plasmas* **20**, 102516 (2013).
11. M. Ali Asgarian, A. Parvazian, M. Abbasi, and J. P. Verboncoeur, "Direct X-B Mode Conversion for High- β National Spherical Torus Experiment in Nonlinear Regime," *Phys. plasmas* **21**, 092516 (2014).
12. M. Abbasi, M. Ali Asgarian, S. Sobahnian, and Y. Sadeghi, "Influence of UHR Localized Oscillation on X-B Mode Conversion Efficiency for High- β National Spherical Torus Experiment in Nonlinear Regime," *Phys. Plasmas* **22**, 6 (2015).
13. A. V. Arefiev, E. J. Du Toit, A. Köhn, E. Holzaur, V. F. Shevchenko, and R. G. L. Vann, "Kinetic Simulation of X-B and O-X-B Mode Conversion," arXiv:1505.01499v1 (6 May 2015).