

**编者按** 空间环境中物质形态主要以等离子体的形式存在, 其中发生的等离子体物理过程(各种等离子体波动和磁场重联等)决定了空间环境中发生的包括磁层亚暴在内各种爆发现象以及伴随高能带电粒子的加速等。因此, 对空间环境中等离子体物理过程的了解是揭示空间环境中各种物理现象发生和发展的基础, 有助于提高对各种空间爆发过程的预报能力, 更好地服务于国家的航天战略。为加强空间等离子体物理领域的学术交流, 促进我国空间物理学科的发展, 《空间科学学报》邀请陆全明作为执行主编, 陈耀、倪彬彬、张清和、周猛作为执行编委, 策划了“空间环境中的等离子体物理过程”专题, 相关论文将在本刊持续刊出。

LIU Gonglin, NING Hao, NI Sulan, LI Chuanyang, ZHANG Zilong, LI Yaokun, CHEN Yao. Simulation on the Mechanism of Harmonic Maser Emission Through the Wave Coalescence Process (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 56–65. CSTR:32142.14.cjss.2024-yg29. DOI:10.11728/cjss.2025.01.2024-yg29

»空间环境中的等离子体物理过程

## 波模并合激发谐频脉泽辐射的泵波模拟\*

刘功林<sup>1</sup> 宁昊<sup>2,1</sup> 倪素兰<sup>3</sup> 李传洋<sup>4</sup>  
张子龙<sup>1,2</sup> 李耀坤<sup>2,1</sup> 陈耀<sup>1,2</sup>

1(山东大学空间科学研究院 威海 264209)

2(山东大学前沿交叉科学青岛研究院 青岛 266237)

3(烟台大学物理与电子信息学院 烟台 264005)

4(德州学院物理与电子信息学院 德州 253023)

**摘要** 损失锥电子驱动的电子回旋脉泽辐射是解释太阳射电尖峰暴的主要机制, 然而在强磁化条件下, 其主要激发的基频辐射在日冕中存在逃逸困难的问题, 谐频辐射的激发可有效解决该问题。最近有研究提出一种新型谐频辐射机制, 即损失锥电子激发的基频 X 模 (X1) 和 Z 模通过波模并合产生谐频辐射。然而其相应非线性波模并合过程仍需进一步研究和论证。研究针对 Z+Z 和 Z+X1 并合产生谐频的新型辐射机制开展了并合条件分析, 发现该过程的并合条件很容易满足, 并可在很宽的传播角范围内激发谐频 X2 辐射。基于此开展泵波粒子模拟可验证非线性波模并合过程的发生, 模拟得到谐频辐射的有效激发, 且并合过程能量转换率在 2%~8%。

**关键词** 相干辐射机制, PIC 模拟, 太阳射电辐射, 非线性过程

**中图分类号** P354

## Simulation on the Mechanism of Harmonic Maser Emission Through the Wave Coalescence Process

\* 国家自然科学基金项目 (12203031, 12103029), 中国博士后科学基金项目 (2022 TQ089) 和山东省自然科学基金项目 (ZR2021 QA033, ZR2023 QA141) 共同资助

2024-10-21 收到原稿, 2024-12-06 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

LIU Gonglin<sup>1</sup>    NING Hao<sup>2,1</sup>    NI Sulan<sup>3</sup>    LI Chuanyang<sup>4</sup>  
 ZHANG Zilong<sup>1,2</sup>    LI Yaokun<sup>2,1</sup>    CHEN Yao<sup>1,2</sup>

1(Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209)

2(Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237)

3(School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005)

4(College of Physics and Electronic Information, Dezhou University, Dezhou 253023)

**Abstract** Electron Cyclotron Maser Emission (ECME) driven by electrons with loss-cone distribution is the main mechanism for explaining solar radio spikes. However, in strongly magnetized plasmas, the losscone-driven ECME mainly generates fundamental X mode emissions, which can be efficiently absorbed when escaping through the second-harmonic layer in the solar corona. To solve the “escaping difficulty”, recent studies suggested a new mechanism of harmonic maser emission (X2) involving nonlinear wave coupling process of Z-mode and fundamental X-mode (X1) waves ( $Z+Z \rightarrow X2$ ,  $Z+X1 \rightarrow X2$ ). It is necessary to verify the nonlinear wave coalescence process with theoretical analyses and numerical simulations. Here, the possibility of a nonlinear wave coupling process is examined *via* solving the matching conditions for three-wave resonant interaction based on the dispersion relation of cold plasma in magneto-ionic theory. The matching conditions for the Z and/or X1 waves were found to be satisfied over a wide range of parameters, leading to the production of X2 emissions that propagate perpendicularly and obliquely relative to the direction of the background magnetic field. Based on the solutions obtained in the matching condition analysis, we selected four sets of solutions of  $Z+Z$  and  $Z+X1$  to perform particle-in-cell simulations using wave pumping method, to verify the nonlinear process of wave coalescence generating second harmonic X-mode emissions. With X1 and/or Z modes correctly pumped in the simulation domain, efficient generation of X2 emissions was observed, with saturation achieved within  $400 \Omega_{ce}^{-1}$ . The conversion rate of energies of X2 emissions to Z mode waves varies from 2% to 8%. The study presents strong evidence to support the new mechanism of harmonic maser emission, which can be widely applied to explain the solar and space radio emissions.

**Key words** Coherent emission mechanism, PIC simulation, Solar radio emission, Nonlinear process

## 0 引言

太阳系中存在很多高强度的射电辐射现象, 这些辐射通常具有高亮温、强偏振和高度动态变化等特性, 需用相干辐射机制进行解释<sup>[1,2]</sup>. 相干辐射是由等离子体不稳定性激发的, 主要包含两类, 一类是电子回旋脉泽辐射 (Electron Cyclotron Maser Emission, ECME), 另一类是等离子体辐射 (Plasma Emission, PE). 其中 ECME 机制主要应用于特征频率比 ( $\omega_{pe}/\Omega_{ce}$ , 等离子体频率与电子回旋频率之比) 小于 1 的条件. 该机制最早由 Twiss<sup>[3]</sup> 于 1958 年提出, 1979 年 Wu 等<sup>[4]</sup> 及后续研究极大地完善了 ECME 理论, 并成功应用于解释地球极光千米波和太阳射电尖峰等射电爆发现象<sup>[5,6]</sup>.

在传统 ECME 机制中, 高能电子通过回旋共振不稳定性线性放大等离子体波模, 直接激发回旋频率及其谐频附近 ( $n\Omega_{ce}$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ ) 的 X 模或 O 模辐射, 故该机制通常具有极高的辐射效率. 需要注意的是, 波模激发应满足两个条件: 一是波模满足回旋共振条件, 二是高能电子携带垂直磁场方向的自由能, 即电子分布在垂直方向具有正梯度. 因此, 在一定的等离子体参数条件下, 高能电子的速度分布类型对激发波模的性质和增长率大小具有决定性的作用.

损失锥分布电子普遍存在于日地空间中的偶极磁场之中. 根据早期的线性理论研究结果, 在日冕环境下, 损失锥分布电子驱动的回旋脉泽过程主要激发基频的 X 模辐射和 Z 模波动, 相应谐频在频率比小于 0.3 的强磁化条件下增长率很低, 几乎无法增

长<sup>[7-9]</sup>. 然而, 在解释太阳射电时, 基频脉泽辐射存在逃逸困难问题, 其在日冕中向外传播时会穿过二次谐波层并被当地热电子共振吸收<sup>[10]</sup>. 谐频辐射的激发可以有效解决该问题<sup>[11-13]</sup>.

2021 年 Ning 等<sup>[14]</sup>开展了全电磁动力学的粒子模拟 (Particle-in-Cell, PIC) 研究, 首次得到了日冕环境下损失锥电子激发的谐频脉泽辐射. 通过分析波模共振条件和演化过程, 该工作提出所得 X 模二次谐频辐射 (X2) 并非由回旋共振过程激发, 而是基于波模并合的新型谐频辐射机制: 即首先由回旋共振激发 X1 与 Z 模, 二者之间发生波模并合过程产生谐频辐射 (Z+X1→X2, Z+Z→X2).

然而, 上述模拟工作中, 系统内波模增长情况较为复杂, 对并合过程的研究只能限于定性分析和讨论. 因此, 有必要开展单独的泵波模拟, 进一步研究和验证波模并合产生谐频辐射的过程, 以及该机制在更广泛参数条件下发生的可能性. 本文基于 Ning 等<sup>[14]</sup>的模拟结果, 对低频率比下 ( $\omega_{pe}/\Omega_{ce}=0.25$ ) Z 模与 X1、Z 模与 Z 模并合产生谐频 (Z+Z→X2, Z+X1→X2) 的非线性过程开展研究, 通过并合条件分析和泵波粒子模拟, 研究并合发生的可能性和能量转化效率.

## 1 研究方法 with 模型

通过理论求解和粒子模拟两种手段开展研究. 理论求解波模并合过程需满足的三波共振条件, 即参与并合的波模与目标模式的频率和波矢需满足如下关系:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3, \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3. \quad (1)$$

其中, 母波 (下角 1 和 2) 为发生共振的模式 (Z 模和 X1), 子波 (下角 3) 为目标模式 (X2), 均为冷等离子体假设下的本征模. 定义磁场方向沿  $z$  方向, 假设波矢平面在  $xOz$  平面构建坐标系,  $\theta$  为波矢与磁场方向夹角. 求解基于冷等离子体色散关系, 频率比 ( $\omega_{pe}/\Omega_{ce}$ ) 为 0.25, 通过在  $(\omega, k, \theta)$  参数空间内遍历母波参数, 代入共振条件中, 寻找满足共振条件的并合解. 根据模拟的波数分辨率, 设置  $k$  的误差值为  $E_{err} = 10^{-3} \Omega_{ce}/c$ , 当并合得到的目标模式满足 X2 色散关系 (误差小于  $E_{err}$ ), 则认为满足三波共振条件, 可并合激发谐频.

在上述理论分析的基础之上, 进一步开展粒子模

拟研究, 使用模拟程序为美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 开发的 vPIC 程序<sup>[15,16]</sup>, 开展 2D3V (空间二维, 速度三维) 的数值模拟研究. 设置模拟空间为  $xOz$  平面; 采用周期性边界条件; 磁场沿  $e_z$  方向 ( $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{e}_z$ ). 模拟参数参照文献<sup>[14]</sup>进行设置, 频率比  $\omega_{pe}/\Omega_{ce}$  为 0.25; 取时间单位为  $\omega_{pe}^{-1}$ , 长度单位为  $c/\omega_{pe}$ ; 模拟总时长为  $4000 \Omega_{ce}^{-1}$ , 时间间隔  $\Delta t = 0.03 \omega_{pe}^{-1}$ , 可解析最大频率  $\omega_{max} = 2.6 \Omega_{ce}$ ; 模拟解域为  $L_x \times L_z = 3072\Delta \times 3072\Delta = 150 \times 150 c/\omega_{pe}$ , 其中  $\Delta = 2.7 \lambda_{DE}$  ( $\lambda_{DE}$  为背景电子德拜长度). 对于时长  $400 \Omega_{ce}^{-1}$  的电磁场数据, 频率和波数分辨率分别为  $1.57 \times 10^{-2} \Omega_{ce}$  和  $1.04 \times 10^{-2} \Omega_{ce}/c$ .

模拟中每个网格投放的背景电子与质子宏粒子数分别为 1000 与 500, 质子与电子质量比为 1836, 均满足麦克斯韦分布, 即

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} v_0^3} \exp\left(-\frac{u^2}{2v_0^2}\right). \quad (2)$$

其中,  $u$  为单位粒子质量的动量. 电子热速度为  $0.018c$  (约 2 MK), 质子与电子等温.

参照文献<sup>[17]</sup>的泵波方法开展模拟, 即通过等离子体波动的磁离子理论推导电场 ( $E_x, E_y, E_z$ ) 与速度 ( $v_x, v_y, v_z$ ) 线性扰动量之间的关系, 磁场扰动量 ( $B_x, B_y, \delta B_z$ ) 可通过安培定理得到. 对于特定波模, 则可假设泵入平面波, 频率和波矢分别为  $\omega$  和  $\mathbf{k}$ , 泵入模式的  $E_x$  扰动量振幅值为  $A_0$ , 以  $E_x$  为基准可得到初始时刻电磁场与速度各扰动分量的幅值大小和空间分布形式, 并以此为初始条件研究波模在系统内的演化过程. 需注意的是, 由于泵波模拟中仅设置了初始时刻的电磁场扰动分布, 系统内会引入反向传播的噪声模式, 本文中仅关注正向传播的波模信号.

模拟采用了较大的空间解域 ( $L_x = L_z = 150 c/\omega_{pe}$ ), 注入较多的宏粒子 (总粒子数约为  $1.4 \times 10^{10}$ ), 故波数分辨率较高, 泵入波模在波数空间内展宽较小, 且背景噪声水平极低, 这为研究并合过程提供了有利条件.

## 2 数值求解和模拟结果

从最近的模拟结果出发, 在一定参数范围内理论求解波模并合激发谐频 (Z+Z→X2 和 Z+X1→X2) 的三波共振条件, 随后在所得并合解中选取多组参考

解, 开展泵波模拟验证.

## 2.1 并合条件的数值求解

根据文献 [14] 的模拟结果, 参与并合的 Z 模与 X1 频率分别在  $1.02$  和  $1.07 \Omega_{ce}$  附近, 故在数值求解波模并合条件时, 将 Z 模频率范围限定在  $1.020 \sim 1.031 \Omega_{ce}$  (上限为 Z 模共振频率), X1 频率范围  $1.059 \sim 1.150 \Omega_{ce}$  (下限为 X 模截止频率),  $\theta$  值范围均为  $0 \sim 2\pi$ , 相应波数则由冷等离子体色散关系求得. 针对 X1 与 Z 模分别取  $\Delta\omega = 2 \times 10^{-5} \Omega_{ce}$  和  $1 \times 10^{-5} \Omega_{ce}$ ,  $\Delta\theta = 1^\circ$  建立网格, 遍历上述参数范围内的 X1 与 Z 模, 可得满足条件的并合解约  $10^5$  组. 由此可知, Z+Z 与 Z+X1 并合产生谐频 X2 的共振条件可以在很大参数范围内满足.

为便于讨论求解结果, 以背景磁场方向为基准建立坐标系, 其中横坐标为平行波矢, 纵坐标为垂直波矢, 将波数空间划分为 I~IV 象限, 对应传播角  $\theta$  由  $0$  变化到  $2\pi$ . 本文仅讨论目标模式 X2 在第一象限的并合解 ( $0 < \theta_{X2} < \pi/2$ ), 而其他象限的结果可通过对称得到. 根据母波的模式和波矢分布, 求得的并合解可分为四种类型. 在每种类型中选取一组解作为参考解, 给出波矢组合及色散关系, 结果如图 1 所示.

分析 Z+Z 并合产生 X2 谐频的情况. 由图 1 可见, Z 模与 X2 在不同传播角度的色散曲线变化不大, 参与并合的 Z 模频率接近共振频率, 相速度较小. 其产生 X2 的机制可大致分为两类. 一类是 I~IV 象限内的 Z 模并合 ( $Z_I + Z_{IV}$ ) 产生倾斜传播 X2 (Case A), 此时参与并合的 Z 模之间平行波数相似, 而垂直波数符号相反且绝对值相差  $2 \Omega_{ce}/c$  左右, 并合产生的谐频 X2 频率为  $2.04 \sim 2.06 \Omega_{ce}$ , 传播角度的范围为  $65^\circ \sim 75^\circ$ . 另一类是 II~IV 象限内的 Z 模 ( $Z_{II} + Z_{IV}$ ) 并合产生准垂直传播 X2 辐射 (Case B), 此时 Z 模之间接近反向传播, 所得 X2 角度范围较小, 仅在  $86^\circ \sim 90^\circ$  传播.

针对 Z+X1 并合情况, 可见参与并合的 Z 模与 X1 分别位于 Z 模共振频率和 X 模截止频率附近, 频率范围分别在  $1.01 \sim 1.03 \Omega_{ce}$  和  $1.05 \sim 1.12 \Omega_{ce}$ , Z 模波数较大, 相速度远低于光速, 而 X1 则相反, 波数较小而相速度较大. 根据 Z 模与 X1 的波矢分布, 同样可将其分为两类, 参与并合的 Z 模分别在 I 和 II 象限 (Case C 和 Case D), 而 X1 始终位于 IV 象限中. 两种情况所得 X2 均为倾斜传播, 传播角的范围分别为  $60^\circ \sim 75^\circ$  和  $80^\circ \sim 86^\circ$ , 后者更接近垂直传播.

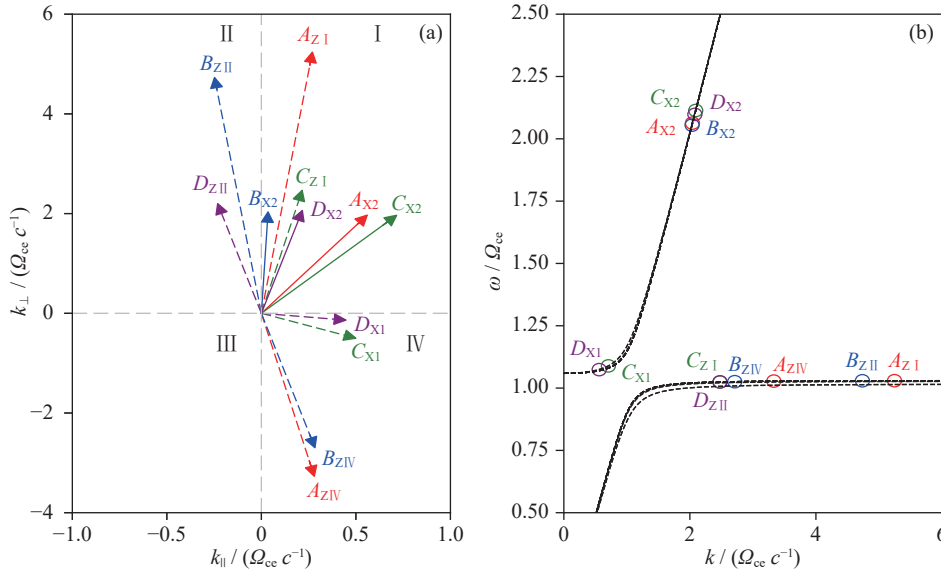


图 1 满足并合条件 ( $Z+Z \rightarrow X2$ ,  $Z+X1 \rightarrow X2$ ) 的四组参考解. (a) Z, X1, X2 的波矢分布, (b) 三种模式在相应传播角度上的频率、波数及其在色散关系上的位置. 其中红色、蓝色、绿色、紫色分别代表 Case A, B, C, D 组解

Fig. 1 Four examples of the solutions of coalescence conditions ( $Z+Z \rightarrow X2$ ,  $Z+X1 \rightarrow X2$ ). (a) Wave vectors ( $\mathbf{k}$ ) of Z, X1 and X2. The dashed arrows point to the wave vector of mother waves, and the solid arrows point to the daughter waves (X2). (b) Frequencies and dispersion curves of Z, X1 and X2 modes. The red, blue, green, and purple arrows refer to the solutions of Case A, B, C and D, respectively

## 2.2 泵波模拟波模并合过程

为进一步验证波模并合激发谐频 X2 的非线性过程, 基于前文选取的四组并合开展泵波模拟, 分别代表四种情况. 模拟中泵入 Z 模与 X1 强度以  $E_x$  振幅为基准, 其频率、波数、角度、初始振幅参数如表 1 所示. 参考文献 [14] 的模拟结果, 设置 Case A, B 中泵入 Z 模的能量相当, Case C, D 中泵入 X1 能量约为 Z 模两倍.

以 Case A ( $Z_I + Z_{IV} \rightarrow X2$ ) 作为参考解. 为确认泵波方法的正确性, 进行两次模拟实验. 分别泵入单一波模  $Z_I$  和  $Z_{IV}$ , 模拟时长  $400 \Omega_{ce}^{-1}$ . 对电磁场扰动进行傅里叶分析, 所得色散空间  $(\omega, k)$  及波数空间  $(k_{\parallel}, k_{\perp})$  分布如图 2 所示. 可见系统内存在增强的模式, 其频率和波数均满足 Z 模色散关系, 且与泵波参数一致, 这表明成功将 Z 模泵入模拟系统中.

表 1 Case A~D 各模式参数

Table 1 Parameters of Z, X1 and X2 modes for Cases A~D

|        | mode     | $\omega (\Omega_{ce})$ | $k (\Omega_{ce}/c)$ | $\theta / (^{\circ})$ | $A_0 (\times 10^{-5} cB_0)$ |
|--------|----------|------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Case A | $Z_I$    | 1.0293                 | 5.242               | 87                    | 3.100                       |
|        | $Z_{IV}$ | 1.0280                 | 3.290               | -85                   | 2.975                       |
|        | X2       | 2.0573                 | 2.040               | 74                    |                             |
| Case B | $Z_{II}$ | 1.0293                 | 4.737               | 93                    | 3.100                       |
|        | $Z_{IV}$ | 1.0256                 | 2.711               | -84                   | 2.875                       |
|        | X2       | 2.0549                 | 2.034               | 89                    |                             |
| Case C | $Z_I$    | 1.0246                 | 2.475               | 85                    | 3.500                       |
|        | X1       | 1.0890                 | 0.707               | -45                   | 2.750                       |
|        | X2       | 2.1136                 | 2.092               | 70                    |                             |
| Case D | $Z_{II}$ | 1.0246                 | 2.478               | 95                    | 3.500                       |
|        | X1       | 1.0740                 | 0.561               | -45                   | 3.275                       |
|        | X2       | 2.0986                 | 2.079               | 85                    |                             |

注  $\omega, k, \theta, A_0$  分别为相应模式的频率、波数、 $k$  与  $B$  夹角、 $E_x$  扰动量振幅值.

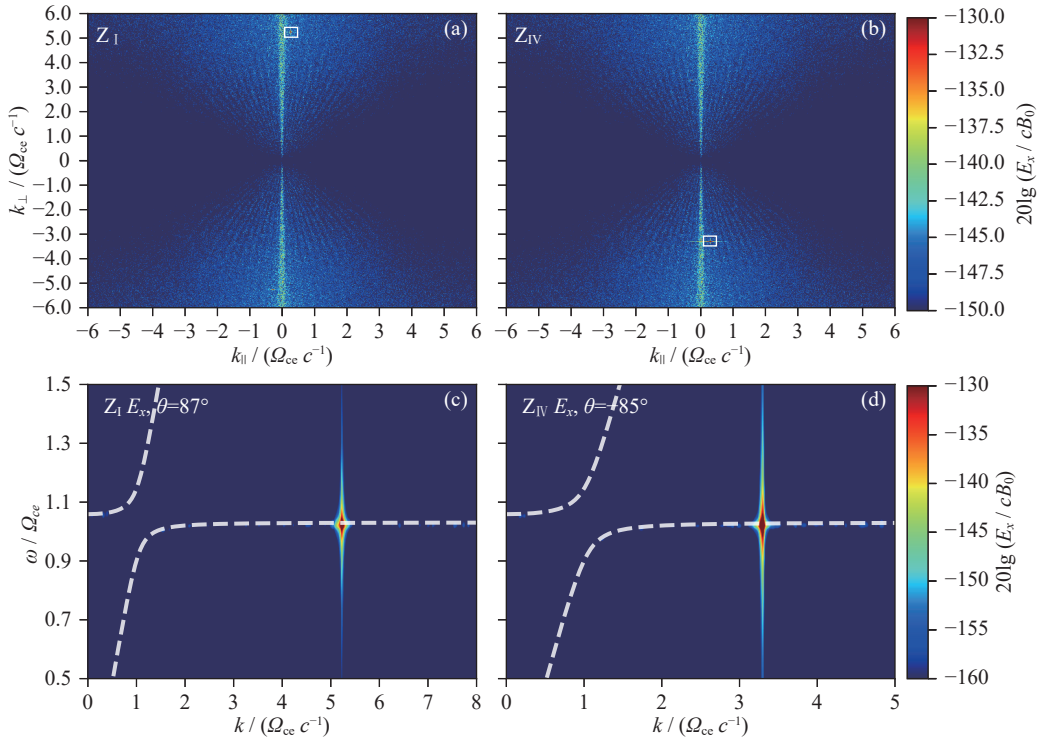


图 2 (a)(b) 单独泵入  $Z_I$  与  $Z_{IV}$  波模时系统内  $E_x$  分量扰动强度在波数空间  $(k_{\parallel}, k_{\perp})$  分布情况, 白色方框内为泵入的 Z 模波. (c)(d) 电场分量  $E_x$  在 Z 模相应传播方向 ( $87^{\circ}$  与  $-85^{\circ}$ ) 的色散空间  $(\omega, k)$  分布. 分析时间段为全模拟时长 ( $0 \sim 400 \Omega_{ce}^{-1}$ ). 白色虚线为冷等离子体波模色散曲线

Fig. 2 (a)(b) Maximum intensity distribution of the  $E_x$  component in the wave vector space  $(k_{\parallel}, k_{\perp})$ .  $Z_I$  and  $Z_{IV}$  modes are pumped individually, marked in the white rectangle. (c)(d) Maximum intensity distribution of the electric field component  $E_x$  in dispersion space  $(\omega, k)$  at the corresponding propagation directions ( $87^{\circ}$  and  $-85^{\circ}$ ) of the Z-mode. The analysis time period is the full simulation duration ( $0 \sim 400 \Omega_{ce}^{-1}$ ).

The white dashed lines present the cold plasma dispersion curve

在模拟中同时泵入能量相近的  $Z_I$  与  $Z_{IV}$  模式, 使其在系统内演化, 总模拟时长  $4000 \Omega_{ce}^{-1}$ , 对最终阶段 ( $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ ) 电场扰动各分量进行傅里叶变换, 可得系统内最强的波模在波数空间 ( $k_{\parallel}, k_{\perp}$ ) 内的分布 (见图 3) 与色散空间 ( $\omega, k$ ) 内的分布 (见图 4). 如图 3 所示, 系统内除泵入模式外, 在  $74^\circ$  出现了新的模式, 其波矢为泵入  $Z_I$  和  $Z_{IV}$  波矢的矢量和 (见图 3a 红色箭头).

图 4 给出了相应角度下的色散空间 ( $\omega, k$ ) 分布, 图 4 中叠加相应模式的冷等离子体色散曲线, 可知在  $87^\circ$  和  $-85^\circ$  的波模为泵入的  $Z_I$  和  $Z_{IV}$ , 二者均在  $E_x$  分量最强, 相应  $E_y$  和  $E_z$  分量强度很低, 表现出很强的静电性质; 系统内新产生的模式落于 X 模色散曲线上, 传播角度为  $74^\circ$ , 频率在  $2.05 \Omega_{ce}$  附近, 相关参数均与波模并合的目标模式 X2 一致, 这表明  $Z_I$  与  $Z_{IV}$  成功并合产生了谐频 X2 电磁辐射. 从图 4 中可以看出, 模拟所得 X2 在  $E_y$  上最强,  $E_z$  分量次之, 其能量远高于背景噪声水平, 但低于泵入母波能量 ( $Z_I$  和  $Z_{IV}$ ), 与母

波能量之比约为  $10^{-2}$ .

同样对 Case B~D 三组并合开展泵波模拟, 研究不同类型的并合过程. 对所得结果进行傅里叶分析, 可得系统内泵入和激发波模的波矢分布 (见图 5), 图 5 中白色和红色箭头分别指向泵入的母波和并合产生的目标模式, 后者波矢为前者的矢量和. 可见三个算例中目标模式波矢处均有较强的激发. 色散空间分布表明新激发模式均为 X 模二次谐频, 其频率、波数与传播角度等参数与理论所得并合解一致, 这表明泵波模拟中均成功产生了 X2 谐频辐射. 图 6 以 Case C 为例给出了相应角度下的色散空间分布, 模拟的并合过程为  $Z+X1 \rightarrow X2$ . 可见系统内成功泵入了母波 Z 模与 X1, 且目标模式谐频 X2 也得到了有效激发, 三种波模的色散关系和波场性质均符合磁离子理论. 文中未给出 Case B 与 D 的色散空间分布.

根据帕斯瓦尔定理计算系统内三种模式能量随时间演化曲线, 结果如图 7 所示. 其中 Case A, B 两算例模拟  $Z+Z$  并合情况, 其中泵入 Z 模初始能量约

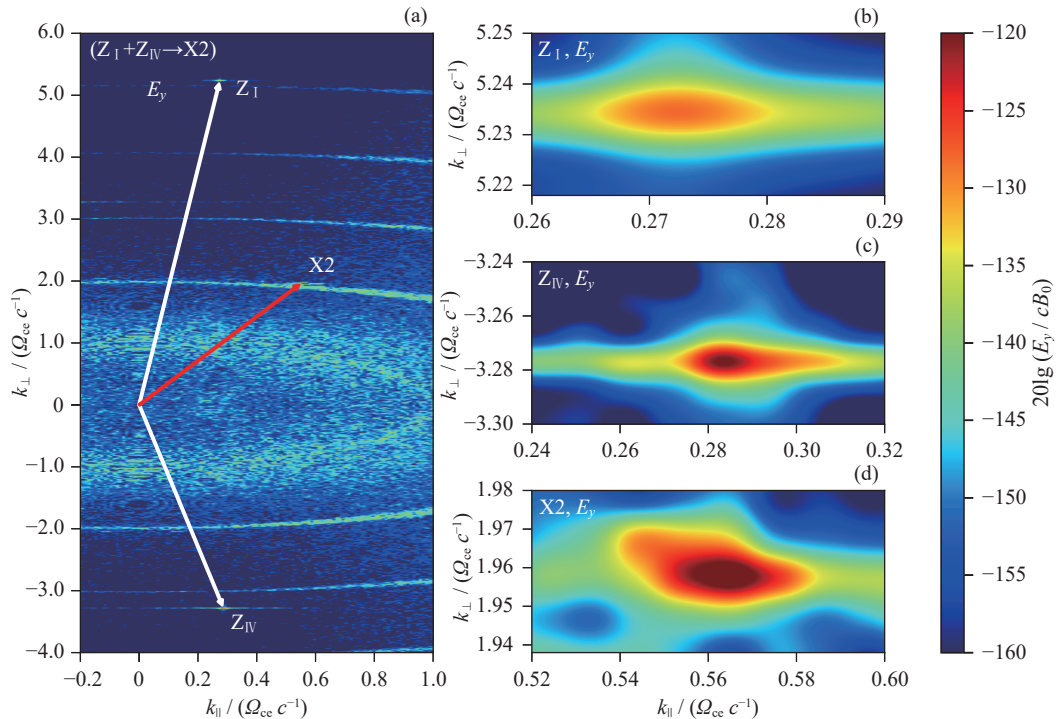


图 3 (a) Case A 中电场  $E_y$  分量在波数空间 ( $k_{\parallel}, k_{\perp}$ ) 分布, 箭头为 ( $Z_I + Z_{IV} \rightarrow X2$ ) 三种波模的波矢关系.

(b)~(d) 分别为  $Z_I$ ,  $Z_{IV}$ , X2 的波数空间放大结果. 分析时间段为  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$

Fig. 3 (a) Maximum intensity distribution of  $E_y$  component in wave vector space ( $k_{\parallel}, k_{\perp}$ ) of Case A. The arrows refer to the wave vectors of the three wave modes ( $Z_I + Z_{IV} \rightarrow X2$ ). (b)~(d) The enlarged views of  $Z_I$ ,  $Z_{IV}$ , X2, respectively. The analysis time period is  $3600$  to  $4000 \Omega_{ce}^{-1}$

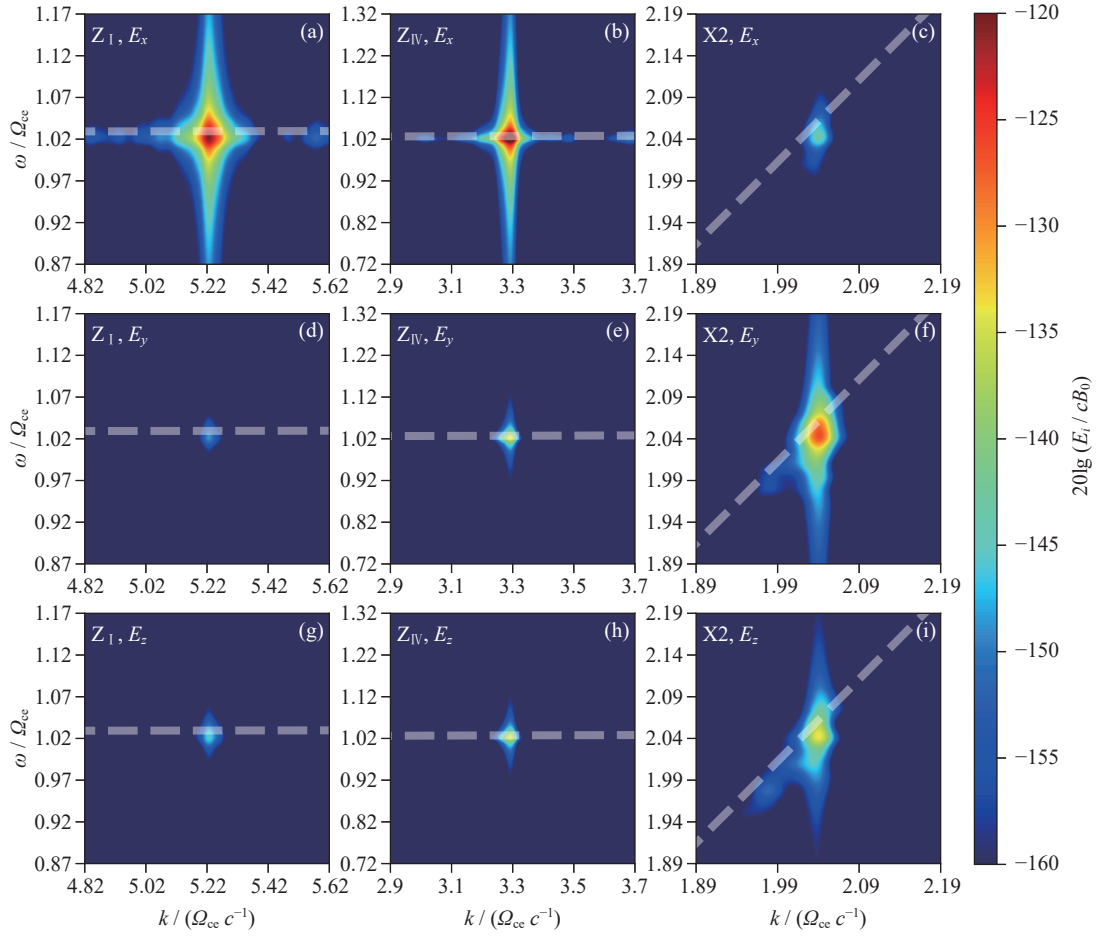


图 4 Case A 中各电场分量强度的色散空间  $(\omega, k)$  分布.  $Z_I, Z_{IV}, X_2$  在相应传播方向 ( $\theta=87^\circ, -85^\circ, 74^\circ$ ) 各电场 ( $E_x, E_y, E_z$ ) 分量的色散空间分布. 分析时间段为  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ . 图中白色虚线为冷等离子体波模色散曲线

Fig. 4 Maximum intensity distribution of each electric field ( $E_x, E_y, E_z$ ) component for  $Z_I, Z_{IV}$ , and  $X_2$  in dispersion space  $(\omega, k)$  at the corresponding propagation directions ( $\theta=87^\circ, -85^\circ, 74^\circ$ ) of Case A. The analysis time period is  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ . The white dashed lines present the cold plasma dispersion curve

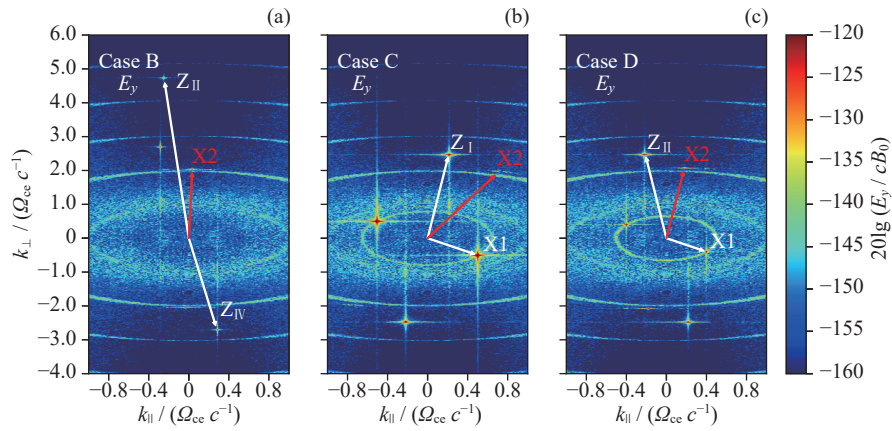


图 5  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$  时间段内 Case B~D 中电场  $E_y$  分量在波数空间  $(k_{\parallel}, k_{\perp})$  分布情况. 白色箭头为对应 Z 与  $X_1$  的波矢, 红色箭头为对应  $X_2$  的波矢

Fig. 5 Maximum intensity distribution of the  $E_y$  component in wave vector space  $(k_{\parallel}, k_{\perp})$  of Cases B~D within  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ . The white arrows represent the wave vectors of Z and  $X_1$ , and the red arrows represent  $X_2$

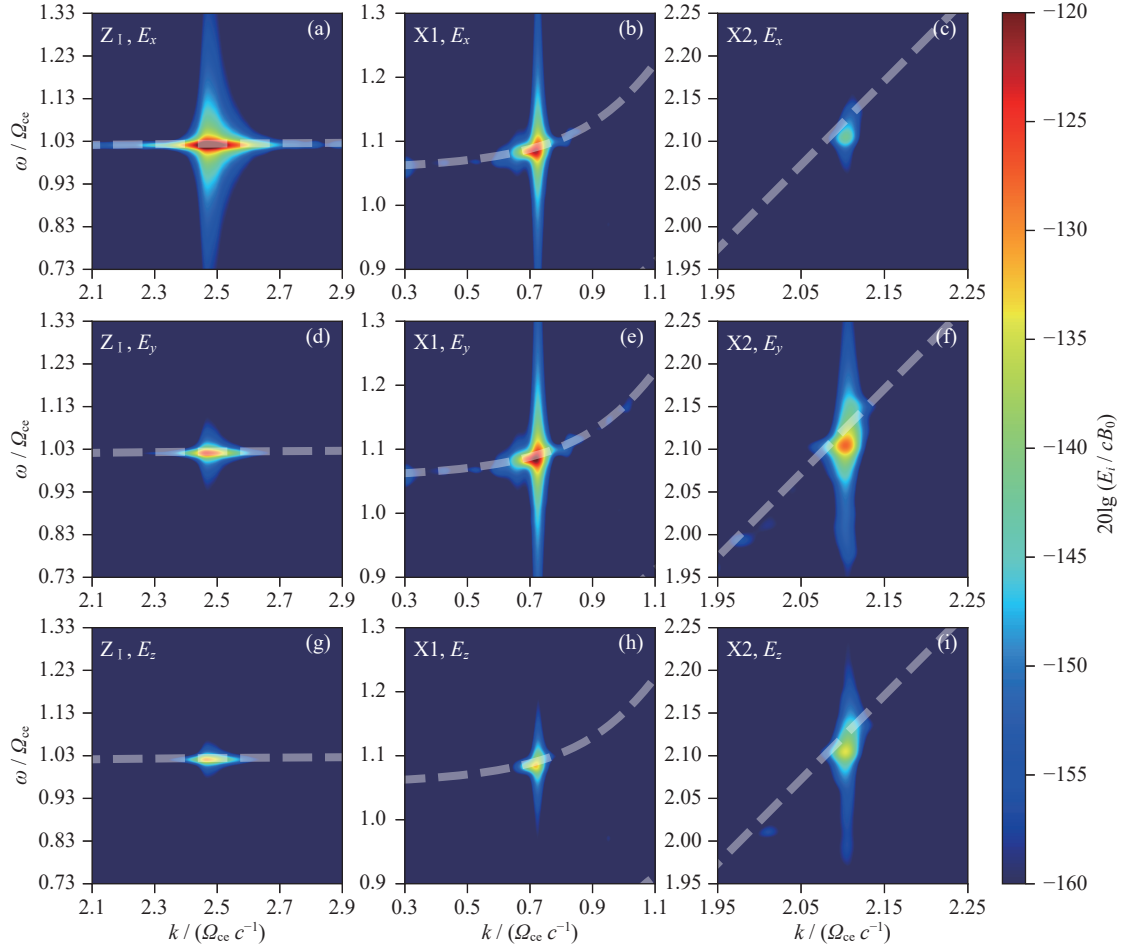


图 6 Case C 中各电场分量 ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) 强度的色散空间 ( $\omega$ ,  $k$ ) 分布. 分析时间段为  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ . 白色虚线为冷等离子体波模色散曲线

Fig. 6 Maximum intensity distribution of each electric field ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) component in dispersion space ( $\omega$ ,  $k$ ) for  $Z_I$ ,  $X1$ ,  $X2$  of Case C. The analysis time period is  $3600 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ . The white dashed lines present the cold plasma dispersion curve

为  $3.8 \times 10^{-6} E_{k0}$ , 随后能量缓慢线性衰减至约  $3 \times 10^{-6} E_{k0}$ . 谐频 X2 能量则在初始阶段迅速线性增长至饱和, 随后能量呈波动式下降, 这两个算例中, 并合过程的能量转化率 (X2 峰值能量与 Z 模初始能量之比) 分别为 8% 和 5%.

对于 Z+X1 并合情况 (Case C, D), Z 和 X1 初始泵波能量分别约为  $5.6 \times 10^{-6} E_{k0}$  和  $1.2 \times 10^{-5} E_{k0}$ , 二者同样随时间线性衰减. 系统内 X2 能量在初始阶段 ( $0 \sim 500 \Omega_{ce}^{-1}$ ) 快速增长至约  $1.0 \times 10^{-7} E_{k0}$  (Case C) 和  $8.3 \times 10^{-8} E_{k0}$  (Case D), 在随后的演化过程中, Case C 中 X2 能量持续缓慢增长至  $4.6 \times 10^{-7} E_{k0}$ , Case D 中 X2 能量呈现波动式增长, 模拟结束时能量为  $1.3 \times 10^{-7} E_{k0}$ , 以 Z 模初始能量

为基准, 两算例中谐频的能量转化率约为 8% 和 2%.

### 3 讨论与结论

研究了低特征频率比下 ( $\omega_{pe}/\Omega_{ce} = 0.25$ ) Z 模与 X1 并合的非线性过程, 验证了波模并合产生谐频辐射的新机制. 基于冷等离子体色散关系求解波模并合条件, 可得大量满足条件的并合解, 其可在很宽的传播角范围内激发 X2 谐频辐射. 根据参与并合的母波模式和波矢分布, 可将并合过程分为四类, 其中在 II 和 IV 象限的 Z 模并合 ( $Z_{II} + Z_{IV}$ ) 产生准垂直传播 X2, 而 I 和 IV 象限的 Z 模并合 ( $Z_I + Z_{IV}$ ) 以及 Z 模与 X1 并合 ( $Z_I + X1$  和  $Z_{II} + X1$ ) 主要产生倾斜

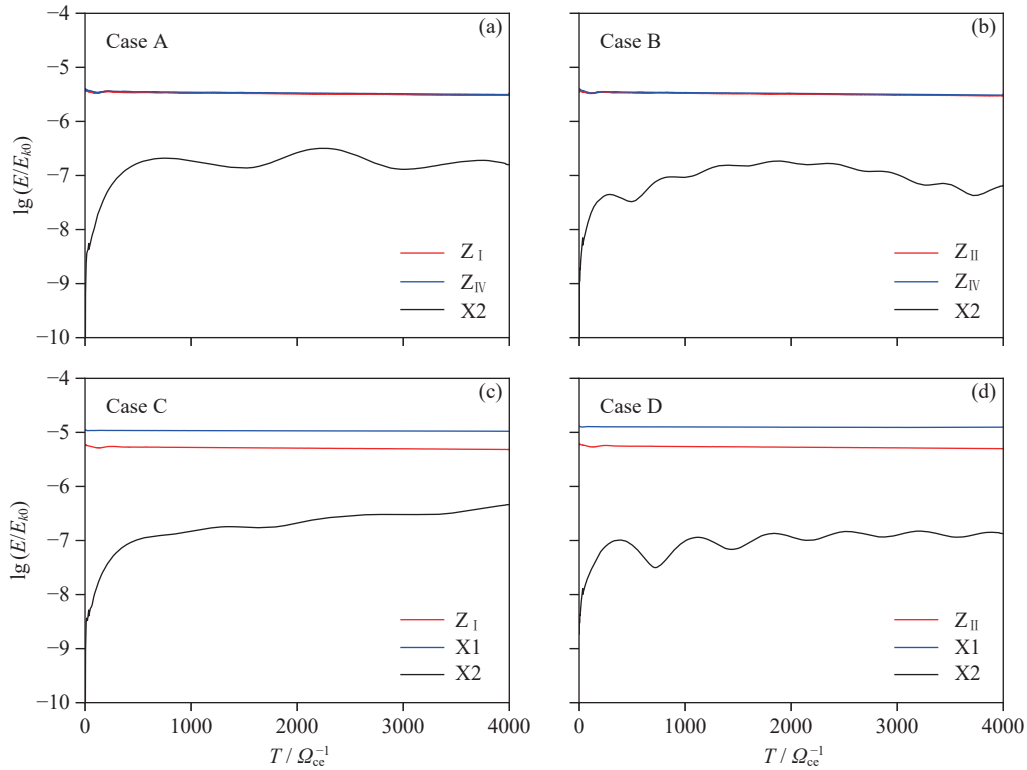


图 7  $0 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$  时间段内, Case A~D 各模式能量随时间演化关系. 所有能量取值均归一化为初始时刻电子总能量  $E_{k0}$

Fig. 7 Temporal evolution of the energies of each mode in Cases A~D in  $0 \sim 4000 \Omega_{ce}^{-1}$ . The values are normalized to the initial kinetic energy of total electrons  $E_{k0}$

传播的 X2 辐射. 针对四种并合过程, 选取四组并合解进行泵波粒子模拟, 结果证明非线性波模并合过程可成功发生, 有效激发谐频辐射. 该过程可在  $400 \Omega_{ce}^{-1}$  时间内发生并达到饱和. 此外, 还计算了谐频激发的模式能量转化效率, 以 Z 模能量为基准, 最终谐频的转化效率为  $2\% \sim 8\%$ .

在早期研究中, Melrose 等<sup>[18,19]</sup> 论证了 Z 模并合产生谐频辐射的可能性, 并提出 Z 模可能与谐频并合产生更高次谐频. 然而相关工作仅限于定性讨论, 缺少精确的计算和模拟验证. 在最近的研究中, 文献 [14] 提出损失锥分布电子激发 Z 模与 X1 辐射, 二者通过波模并合产生谐频的新型辐射机制. 本文通过理论和模拟工作进一步验证了并合过程发生的可能性, 同时还发现 Z 模与 X1 之间并合 (Z+Z 或 Z+X1) 产生谐频的共振条件很容易满足, 产生谐频的传播角范围很宽, 故该过程在谐频辐射的产生机制中具有很大的应用前景.

分析模拟结果发现, Z+Z 并合产生谐频的能量转

化率高于 Z+X1 并合结果, 且两种情况下能量转化率仅为  $2\% \sim 8\%$ , 远低于文献 [14] 的模拟结果 (30%). 这可能是由于本模拟中仅泵入单色波模所致. 由于 Z 模在接近共振频率处群速度极小, 随波数增大频率几乎不变, 因此在很大范围内的 Z 模均可并合产生谐频 X2, 从而大大增加并合效率. 后续研究中将在同系统中泵入更大频率和波数范围的波模, 研究其对能量转化率的影响.

Z 模作为非逃逸模式, 在地球、木星、土星等磁层环境中广泛存在, 并有大量观测数据证实. 特别在行星磁层中, Z 模对于解释非热连续辐射或窄带辐射的产生机制具有重要作用<sup>[20,21]</sup>. 进一步研究将扩大模拟参数范围, 研究本文所讨论的谐频辐射机制在不同参数条件下发生的可能性与效率, 讨论其在不同空间环境的应用价值.

## 参考文献

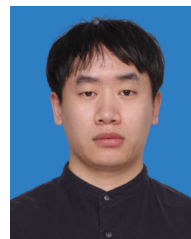
- [1] TREUMANN R A. The electron-cyclotron maser for astro-

- physical application[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2006, **13**(4): 229-315
- [2] MELROSE D B. Coherent emission mechanisms in astrophysical plasmas[J]. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2017, **1**(1): 5
- [3] TWISS R Q. Radiation transfer and the possibility of negative absorption in radio astronomy[J]. *Australian Journal of Physics*, 1958, **11**(4): 564-579
- [4] WU C S, LEE L C. A theory of the terrestrial kilometric radiation[J]. *The Astrophysical Journal*, 1979, **230**: 621-626
- [5] WU C S. Kinetic cyclotron and synchrotron maser instabilities: radio emission processes by direct amplification of radiation[J]. *Space Science Reviews*, 1985, **41**(3): 215-298
- [6] ASCHWANDEN M J. Relaxation of the loss-cone by quasi-linear diffusion of the electron-cyclotron maser instability in the solar corona[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1990, **85**: 1141-1177
- [7] YOON P H, ZIEBELL L F. Quasilinear evolution of cyclotron maser instability[J]. *Physical Review E*, 1995, **51**(5): 4908-4916
- [8] ZIEBELL L F, YOON P H. Quasilinear analysis of loss-cone driven weakly relativistic electron cyclotron maser instability[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, **2**(4): 1285-1295
- [9] LEE S Y, YI S, LIM D, *et al.* Loss cone-driven cyclotron maser instability[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(11): 7036-7044
- [10] MELROSE D B, DULK G A. Electron-cyclotron masers as the source of certain solar and stellar radio bursts[J]. *The Astrophysical Journal*, 1982, **259**: 844-858
- [11] YOUSEFZADEH M, NING H, CHEN Y. Harmonic electron cyclotron maser emission excited by energetic electrons traveling inside a coronal loop[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **909**(1): 3
- [12] NING H, CHEN Y, NI S L, *et al.* Harmonic electron-cyclotron maser emissions driven by energetic electrons of the horseshoe distribution with application to solar radio spikes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **651**: A118
- [13] YOUSEFZADEH M, CHEN Y, NING H, *et al.* Harmonic electron cyclotron maser emission along the coronal loop[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **932**(1): 35
- [14] NING H, CHEN Y, NI S L, *et al.* Harmonic maser emissions from electrons with loss-cone distribution in solar active regions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **920**(2): L40
- [15] BOWERS K J, ALBRIGHT B J, YIN L, *et al.* Ultrahigh performance three-dimensional electromagnetic relativistic kinetic plasma simulation[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, **15**(5): 055703
- [16] BOWERS K J, ALBRIGHT B J, YIN L, *et al.* Advances in petascale kinetic plasma simulation with VPIC and Roadrunner[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, **180**: 012055
- [17] NI S L, CHEN Y, LI C Y, *et al.* An alternative form of the fundamental plasma emission through the coalescence of Z-mode waves with whistlers[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, **28**(4): 040701
- [18] MELROSE D B, HEWITT R G, DULK G A. Electron-cyclotron maser emission: relative growth and damping rates for different modes and harmonics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1984, **89**(A2): 897-904
- [19] MELROSE D B. Emission at cyclotron harmonics due to coalescence of Z-mode waves[J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, **380**: 256
- [20] GURNETT D A. The earth as a radio source: the nonthermal continuum[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(19): 2751-2763
- [21] YE S Y, MENIETTI J D, FISCHER G, *et al.* Z mode waves as the source of Saturn narrowband radio emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A8): A08228

## 作者简介



**刘功林** 男, 2001年5月出生于新疆维吾尔自治区克拉玛依市, 现为山东大学空间科学与技术学院硕士研究生, 主要研究方向为射电辐射产生机制、空间等离子体物理数值模拟等。  
E-mail: 202317793@mail.sdu.edu.cn



**宁昊(通信作者)** 男, 1995年9月出生于山东省泰安市, 现为山东大学前沿交叉科学青岛研究院博士后, 主要研究方向为太阳耀斑非热辐射、射电相干辐射机制等。  
E-mail: haoning@sdu.edu.cn