

# 基于超算暨 HPIC-LBM 的大时空尺度三维湍流磁重联数值模拟研究

颜 辉<sup>1</sup> 朱伯靖<sup>2</sup> 万 文<sup>1</sup> 钟 英<sup>1</sup> David A Yune<sup>3</sup>

(中山大学国家超级计算广州中心 广州 510006)<sup>1</sup>

(中国科学院云南天文台暨中国科学院天文大科学中心 昆明 650216)<sup>2</sup>

(美国哥伦比亚大学应用物理和数学系 纽约 10027)<sup>3</sup>

**摘 要** 大时空尺度湍流磁重联(LTSTMR)是空间物理、太阳物理、宇宙学领域中一种普遍存在的爆发现象。磁能转移-释放-耗散、等离子体加热及高能粒子加速是研究该类现象的核心内容,而研究湍流在 LTSTMR 中如何起作用为解决以上问题的关键所在。2D/2.5D 磁重联模型因其在物理图像简化方面忽略了自然界爆发现象的 3D 属性和本质。文中基于新型 HPIC-LBM 粒子算法,在天河 2 号平台上开展了 LTSTMR 十万核级别的数值实验工作。首次获得了太阳大气活动磁重联精细演化(0~500km)耗散区内 oblique 不稳定性证据。证明了耗散区内微观集体集合效应宏观表现的 3 种具体形式:湍流磁场 self-generating-organization、湍动等离子体 self-feeding-sustaining 及磁场与等离子体间的相互作用。该研究为在超算平台上应用三维磁重联模型开展大时空尺度湍流磁重联提供了一种新途径。

**关键词** HPIC-LBM, 三维湍流磁重联, 大时空尺度, 磁能转移-释放-耗散, 高能粒子加速, 高性能计算

**中图分类号** O124, O453 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.08.014

## HPIC-LBM Method Based Simulation of Large Temporal-Spatial Scale 3D Turbulent Magnetic Reconnection on Supercomputer

YAN Hui<sup>1</sup> ZHU Bo-jing<sup>2</sup> WAN Wen<sup>1</sup> ZHONG Yin<sup>1</sup> David A YUNE<sup>3</sup>

(National Supercomputer Center in Guangzhou, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)<sup>1</sup>

(Yunnan Observatories, Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China)<sup>2</sup>

(Applied Physics and Applied Mathematics Department, Columbia University, New York 10027, USA)<sup>3</sup>

**Abstract** Large temporal-spatial scale turbulent magnetic reconnection (LTSTMR) is a general explosive astrophysical phenomena in space physics, solar physics and cosmology. To investigate this phenome, the mechanism of magnetic energy transfer-release-dissipation, plasma heating and acceleration of high energy particle should be learned, where the key is the role of turbulence. Previous 2D/2.5D simulation can only provide simplified physical pictures, which ignores the 3D nature and properties. By HPIC-LBM simulation on Tianhe-2 from National Supercomputer Center in Guang Zhou (NSCCGZ) with up to 100 000 CPU cores, the existence of oblique instability was firstly proved from fine structure simulation (0~500 km) of solar atmosphere activities. It also presented three kind of macroscopic representation inside the dissipation area: self-generating-organization, self-feeding-sustaining and interaction between magnetic field and plasma. This research provides a new tool for investigating 3D LTSTMR phenomenon on supercomputer.

**Keywords** HPIC-LBM, 3D turbulent magnetic reconnection, Large temporal-spatial scale, Magnetic energy conversion-release-dissipation, Particle accelerating, High performance computing

## 1 引言

磁重联作为地球电离层-磁层异常、空间天气、太阳物理

和宇宙学中普遍存在的一种爆发现象,是研究诸如太阳大气活动、行星磁层、吸积盘、脉冲星磁层等内部核以及大气磁能转移-释放-耗散、等离子体加热和粒子加速的一把钥匙<sup>[1-3]</sup>。

到稿日期:2018-07-23 返修日期:2018-11-20 本文受中国科学院前沿局重点项目(QYZDJ-SSW-SLH012),国家自然科学基金广东联合基金(U1501501),广东省引进创新创业团队项目(2016ZT06D211),中山大学超算应用培育专项资助。

颜 辉(1987-),男,博士,工程师,CCF 会员,主要研究方向为高性能计算,E-mail: hui.yan@nsc-gz.cn;朱伯靖(1974-),男,博士,副教授,主要研究方向为大时空尺度湍流磁重联耗散区磁能释放-转移-耗散、等离子体加热及粒子加速,E-mail: bjzhu@ynao.ac.cn(通信作者);万 文(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向为超级计算机架构和异构系统;钟 英(1989-),女,硕士,工程师,主要研究方向为高性能计算和应用软件优化;David A Yune(1944-),博士,教授,主要研究方向为地球动力学。

近 10 年来,国际上三维磁重联在宏观大尺度和微观小尺度方面取得了一系列研究成果。然而,宏观三维模型对扩散区的假设过于简化,无法实现对磁场变化与等离子体运动间相互自洽耦合过程的物理描述,无法定量分析磁能与等离子体能间的转化过程<sup>[4-6]</sup>;而微观三维模型算法对计算资源的需求十分苛刻,目前只能研究电子和离子特征长度上扩散区内的物理图像,无法对自然界中广泛存在的大时空尺度湍流磁重联三维磁拓扑精细结构的演化进行研究<sup>[6-12]</sup>。

在大时空尺度三维湍流磁重联精细演化数值模拟方面(见图 1),无论是侧重于大尺度的 NIVANA, ZEUS, ATHENA, FLASH, 还是侧重于中小尺度的 HPIC, TESTING-PARTICLE, VPIC 和 IPIC, 都无法实现对湍流磁重联 Kinetic-Dynamic-Hydro 连续耦合尺度的定量分析,而这些又是研究磁场湍动(self-generating-organization)、等离子体运动湍动

(self-feeding-sustaining)及两者间相互作用中的扩散区磁能与等离子体能间相互转化、等离子体加热及粒子加速的物理图像基础<sup>[9-10]</sup>。从公开发表的文献来看,国内外尚无对 Kinetic-Dynamic-Hydro 连续尺度耦合数值方法的公开报道。

本研究主要贡献包括:1)首次提出大时空尺度湍流磁重联(LTSTMR)概念,其定义为观测宏观电流片厚度与等离子体带电粒子惯性长度比大于  $10^7 \sim 10^8$ ,且观测宏观演化时间与带电粒子回旋周期比大于  $10^7 \sim 10^9$ ,磁重联为大时空尺度湍流磁重联。2)首次提出了一种适用于超算的 LTSTMR 数值模拟 HPIC-LBM 粒子算法。3)通过数值模拟,首次获得了太阳大气磁重联精细演化(0~500 km)耗散区内 oblique 不稳定性证据,证明了耗散区内微观集体集合效应宏观表现的 3 种具体形式:湍流磁场 self-generating-organization、湍动等离子体 self-feeding-sustaining 及磁场与等离子体间的相互作用。

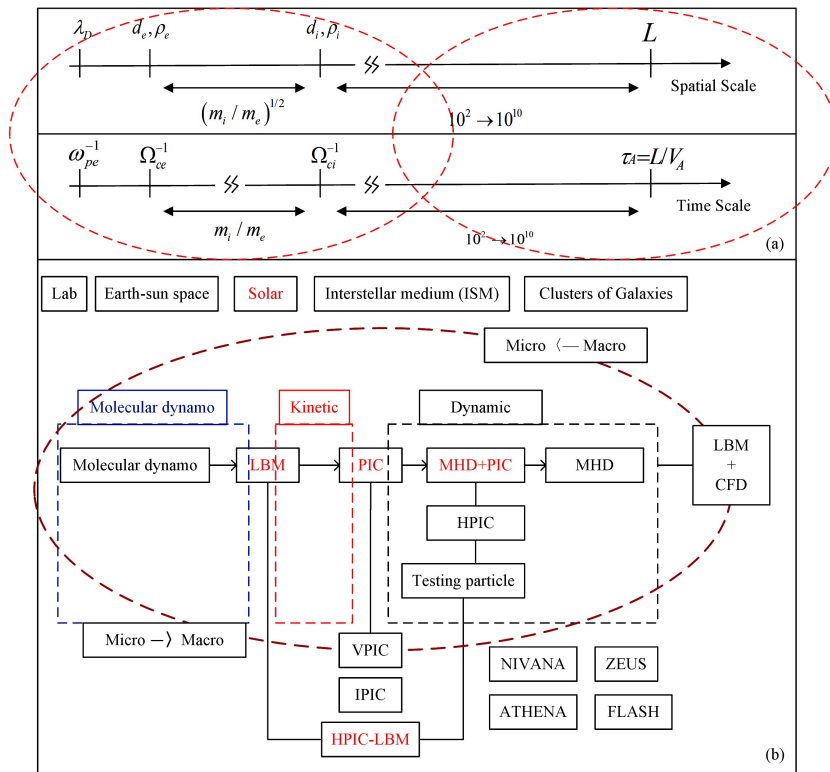


图 1 不同时空尺度的磁重联数值方法

Fig. 1 Different numerical methods for different temporal-spatial scale astrophysical magnetic reconnection problem

## 2 基本方程

从等离子体微观物理出发,基于统计力学平均场描述,以离子和电子分布函数为未知量的玻尔兹曼-麦克斯韦方程可由式(1)一式(3)<sup>[13]</sup>表示:

$$\frac{\partial f^a}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon^a} \mathbf{U}^a \cdot \nabla f^a + \left( \frac{1}{\epsilon^a} \mathbf{E} + (\delta^a)^2 \mathbf{U}^a \times \mathbf{B} \right) \cdot \frac{\partial f^a}{\partial \mathbf{p}^a} = \frac{\theta^a}{(\epsilon^a)^2} \nabla_{\mathbf{p}^a} \cdot (\nabla_{\mathbf{p}^a} f^a + \mathbf{U}^a f^a) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \partial_t E(t, r) - \nabla \times B(t, r) = -\frac{j_z}{\zeta_e} + J \\ \zeta_e^2 \partial_e^2 \partial_t B(t, r) + \nabla \times E(t, r) = 0 \\ \nabla \cdot E(t, r) = \rho_e + D \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \partial_t E(t, r) - \nabla \times B(t, r) = -\frac{j_z}{\zeta_i} + J \\ \zeta_i^2 \partial_i^2 \partial_t B(t, r) + \nabla \times E(t, r) = 0 \\ \nabla \cdot E(t, r) = \rho_i + D \end{cases} \quad (3)$$

求解式(1)一式(3),可实现 Kinetic-Dynamic-Hydro 连续尺度数值模拟研究,但求解以上方程组需要巨大的计算资源。相关研究都是依托超算开展的,如 Karimabadi, Daughton, Drake, Swisdak, Shay 等在 Hopper 的工作;Daughton, Bowers 等在 Roadrunner, Titan 的工作;Pritchett 在 Kraken 的工作;Markidis, Lapenta, Laure, Newman 等在 Lindgren 及 Pleiades 的工作。

### 3 理论模型

HPIC-LBM 中,利用描述等离子体运动方程与磁强强度变化方程在数学表示和物理图像上的类似(similar),将磁场强度定义为一种特殊流体(virtual flow)。

依据模拟区域内等离子体数密度化和磁场强度的梯度变化来控制 HPIC-LBM 格点大小,从而使粒子特征长度(ion and electron inertial length)及回旋周期(ion and electron gyro time)满足式(1)–式(3)中对假想带电粒子特征长度(pseudo ion and electron inertial length)及假想回旋周期(pseudo ion and electron gyro time)的描述是 HPIC-LBM 提

高计算效率的基本途径。

结合 PIC 与 HPIC 格点模型,可建立起 HPIC-LBM 格点模型(见图 2);在 HPIC-LBM 中,我们把依据所研区域内等离子体数密度梯度变化的 HPIC-LBM 格点自适应重新定义为带电粒子自适应格点(CAGR),把依据所研区域内磁场强度梯度变化的 HPIC-LBM 格点自适应重新定义为磁场强度的自适应格点(MAGR),从而实现 HPIC-LBM 格点模型自适应需求。可以看出,HPIC-LBM 是直接求解玻尔兹曼-磁感应方程的,其计算效率得到了大幅提高,并且其对 Kinetic-Dynamic-Hydro 连续尺度磁能与等离子体转化物理图像的描述与真实情形更吻合<sup>[13-16]</sup>。

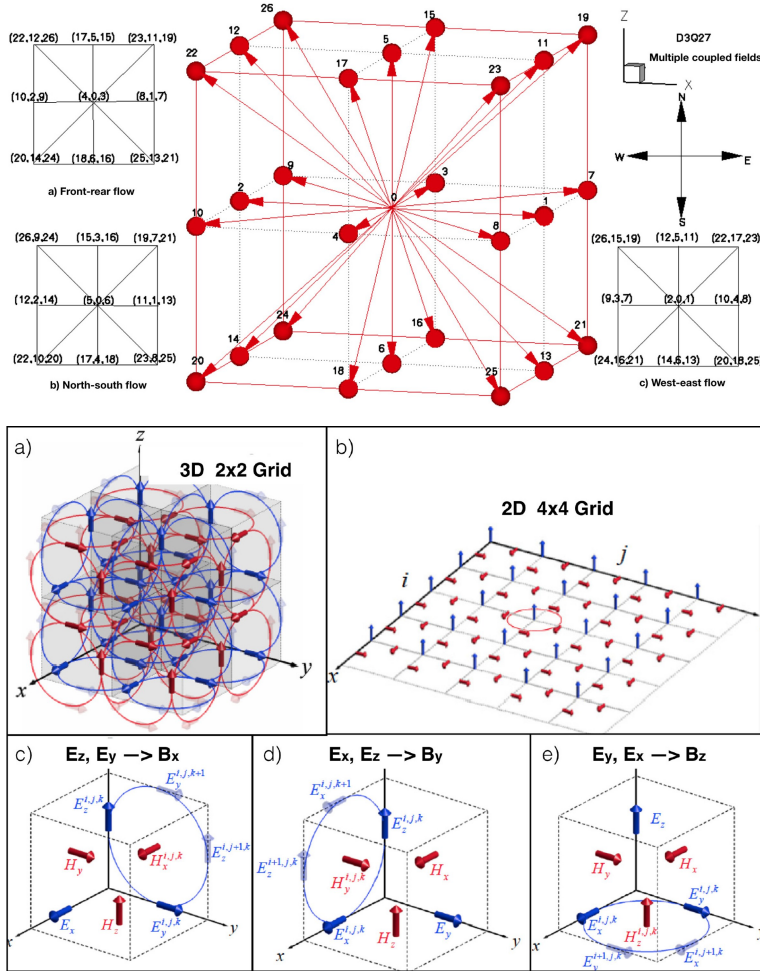


图 2 HPIC-LBM 格点模型  
Fig. 2 HPIC-LBM grid model

### 4 数学模型及算法

为求解玻尔兹曼-麦克斯韦方程组,我们引入了广义分布函数  $f(x, p, t)$ ,  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  代表电子、离子、磁场、电场;  $x, p, t$  代表空间、动量、时间; HPIC-LBM 格点模型中第  $\alpha$  类流体的第  $i$  个分布函数在相空间  $(x, p, t)$  处的  $f_{ia}^{c,q}$  与  $(x + \delta x, p + \delta p, t + \delta t)$  处的  $f_{ia}$  的关系式可表示为:

$$f_{ia}(x + U_{ia}\delta t, m_a U_{ia} + m_a \delta U_{ia}, t + \delta t) - f_{ia}(x, m_a U_{ia}, t) = \frac{1}{\tau_a} (f_{ia}(x, m_a U_{ia}, t) - f_{ia}^{c,q}(x, m_a U_{ia}, t)) \quad (4)$$

其中,  $i$  的变化范围会因  $\alpha$  的不同而不同。关于分布函数及迭代过程的具体推导请参阅文献<sup>[13-16]</sup>。

通过式(4),就可在模拟区按图 2 所示的 HPIC-LBM 格点模型对电磁场与带电粒子间的相互作用进行数值模拟研究。实际模拟中,还需同时定义:1)初始磁场拓扑结构位形函数及不同类型流体基本参数;2)区域边界条件;3)模拟区几何自适应网格、不同类型流体自适应格点及其与分形指数间的关系;4)物理误差、系统误差及自洽关系等。

图 3 为 HPIC-LBM 程序简略框图,可以看出前后处理及分布函数计算可通过 GPU 实现,计算部分可通过 CPU 实现。

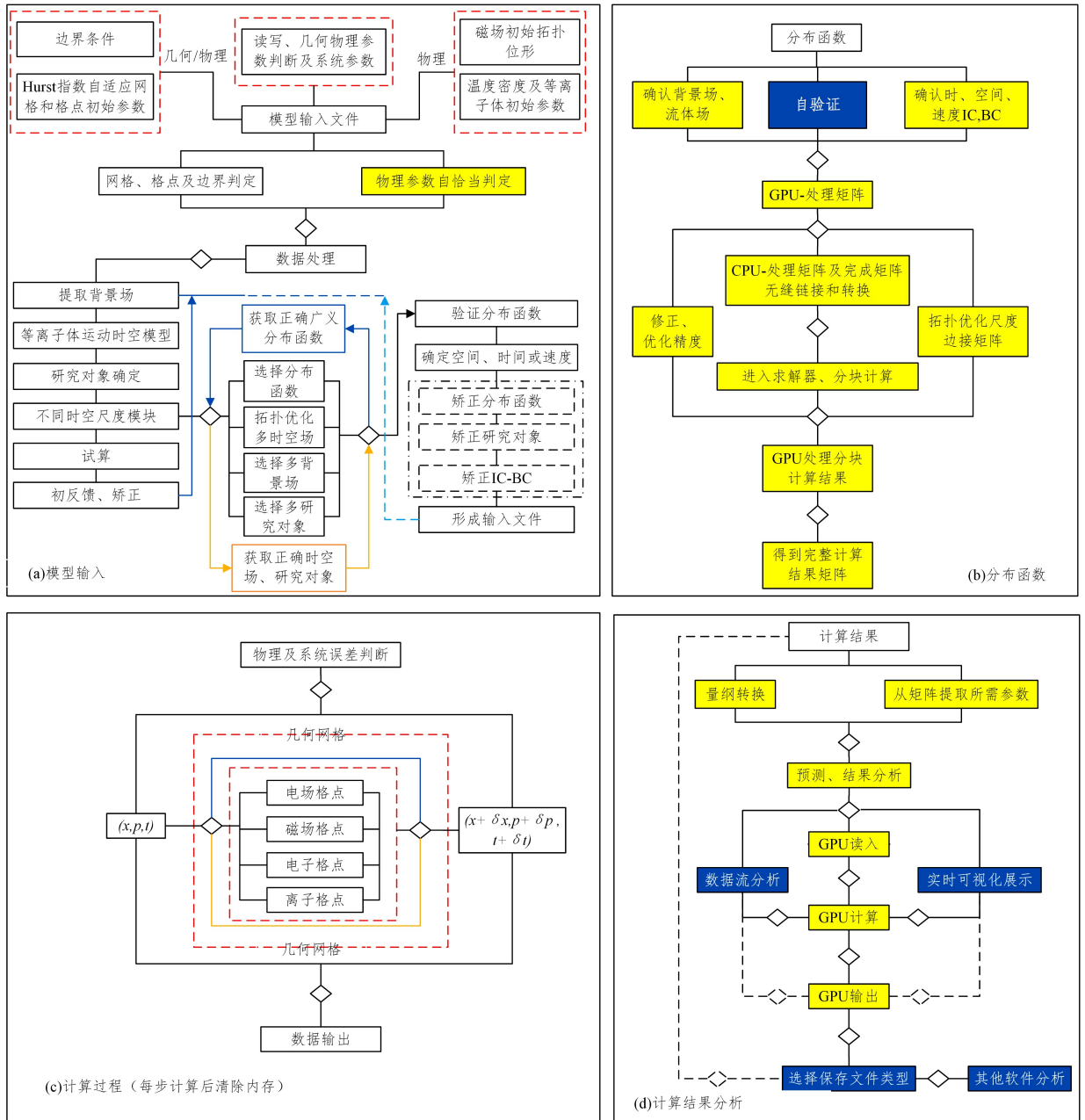


图3 HPIC-LBM流程图

Fig. 3 Flow chart for HPIC-LBM

## 5 并行算法及优化

为得到不同类型流体的分布函数及其迭代计算过程(式(4)),需要对其在模拟区域内的计算进行分块并行处理。HPIC-LBM中,各种不同类型的粒子在不同的格点模型中相空间中的分布函数的离散与几何空间内的运动较容易实现并行,可直接对结构化网格及其对应格点进行分块处理<sup>[13-16]</sup>。把不同类型的粒子在相空间中的碰撞考虑进去后,由于相同模拟区域(几何空间)、相同模拟格点(物理空间)上各个参数所需的计算量以及读取任务不同,简单的分块处理无法满足并行计算的需求,因此这个问题一直是困扰包括现有PIC方法、LBM方法研究磁流体动力学(MHD)问题的难点之一。

HPIC-LBM中常用方案主要有两种:1)以单粒子 $N$ 核心算例为例,采用GPU-CPU混合编程。前 $N-1$ 个CPU核心处理粒子的相空间运动,第 $N$ 个CPU核心把前 $N-1$ 个CPU核心处理的所有粒子的碰撞运动计算指向一个GPU节点,通过GPU多核加速来抵消粒子碰撞带来的计算费用的增量。实际计算中,因粒子类型至少存在3种以上(如只考虑完全电离情形下的电子磁重联问题,HPIC-LBM中的粒子类型包括电子流体、虚拟磁场流体、虚拟电场流体),可以把 $N-1$ 个CPU核心的计算分配给 $N-1$ 个CPU节点,把第 $N$ 个CPU核心的工作直接分配给一个单独的GPU节点来完成。2)把框架流程图中适合GPU的部分在算法上直接截取出来单独计算;CPU计算结果进行保存后,再利用GPU对计算结果进行二次计算,得到最终结果。

## 6 大尺度湍流磁重联数值模拟

### 6.1 基本参数

实验参数设置如下:  $T=1.0 \times 10^6 \text{ K}$ ,  $n=1.0 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ,  $B=10 \text{ G}$ ,  $m_e=9.1093826 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $m_i=1.6726231 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $\omega_{ce}^{-1}=6.58 \times 10^{-4} \text{ s}$ ,  $\omega_{ci}^{-1}=6.56 \times 10^3 \text{ s}$ ,  $d_e=0.3 \text{ m}$ ,  $d_i=142 \text{ m}$ ,  $N_0=n+n \times \text{sech}^2(x/D)=0.1 \text{ n}$ ,  $T_i/T_e=5$ ,  $T_{bk}/T_{cs}=0.1$ ,  $B_i/B_{bk}=0.1$ ,  $L_x \times L_y \times L_z=1600d_i \times 3200d_i \times 5120d_i$ 。实验使用了 86400 个 CPU 核心,运行 27 小时,实现 200 s 模拟过程。

### 6.2 模拟结果

从图 4 可看出,  $y$  方向不同的  $xoz$  截面上磁场拓扑结构不同,与二维模型存在本质区别。磁矢势在  $xoz$  平面上的投影随时间的演化反映了撕裂膜的不稳定性,这在图 4 中表现为磁岛形成、破裂、融合;相同  $xz$  坐标值下,磁矢势沿  $y$  方向随时间的演化反映了其扭曲不稳定的特性;两者的共同作用

表现为三维磁场磁绳形成、相互融合、分叉演化过程。撕裂膜不稳定性与扭曲不稳定的共同作用,形成了三维磁重联模型中特有的 Oblique 不稳定性;更详细的 Oblique 不稳定性证据可从相电流密度  $xoz$ ,  $yoz$  及任意截面投影云图观测到。从图 4 所示的电流密度演化可以看出,随着时间的延长,扩散区内电流片的演化会出现显著破裂,电流片破裂会形成更多更小尺度的电流片,为其中扩散区内的粒子加速提供了更大的区域、更长的时间。为更深入地研究三维 Oblique 的不稳定性,我们对随时间变化的磁绳扭曲、合并、分叉和形成网络结构进行了进一步分析。如图 5 所示,随着时间的增加,磁绳  $y$  方向  $xoz$  平面投影截面极向模从初始  $m=1$  不断增大至 4,磁绳不断扭曲、合并、分叉;当  $m>4$  时,oblique 的不稳定性进入非线性阶段,磁绳在整个三维空间内分叉并形成完整的网络结构。从图 5 还可看出,本文从模拟中得到的三维磁重联拓扑结构变化模式与从三维理论模型中得到的磁力线局部三维双曲结构以及局部三维椭圆结构相同<sup>[1-4]</sup>。

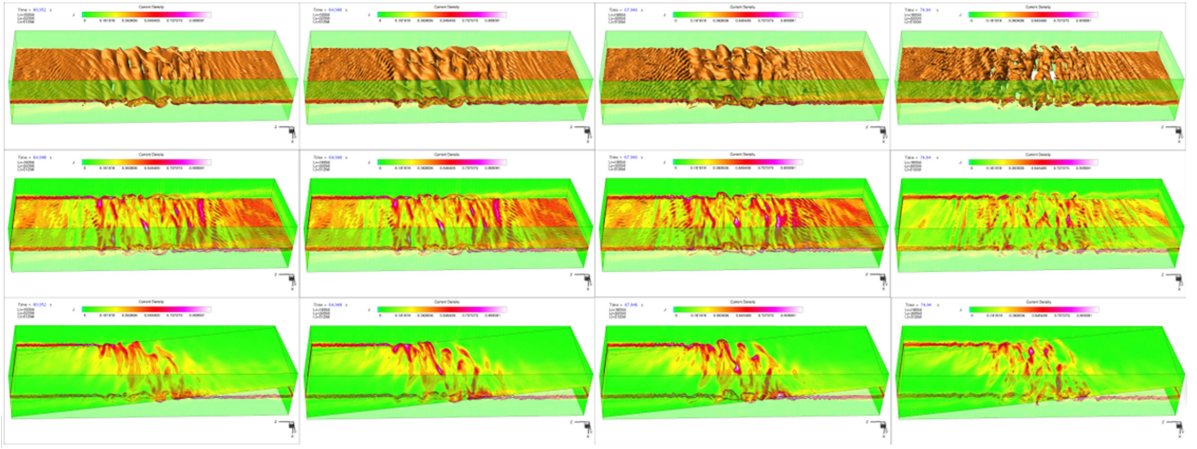


图 4 磁矢势及电流强度在 60.952 s 到 74.94 s 间的演化过程

Fig. 4 Evolution process of magnetic potential vector and current density during 60.952 s to 74.94 s

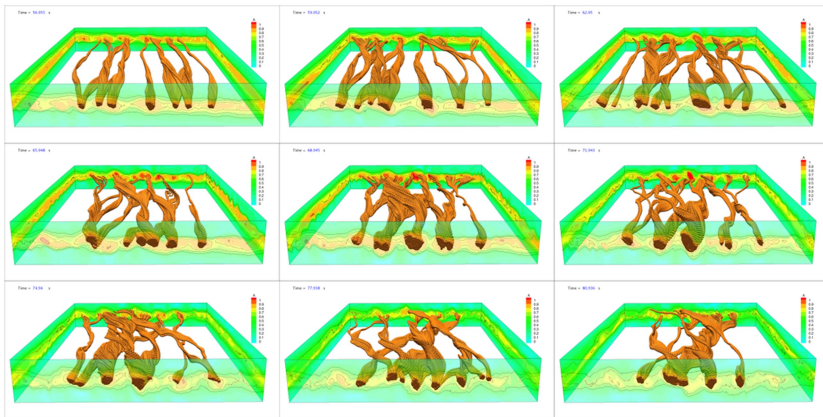


图 5 磁场螺旋拓扑结构在 56.955 s 到 80.936 s 间的演化过程

Fig. 5 Evolution process of helical topological structure of magnetic field during 56.955 s to 80.936 s

**结束语** 自 20 世纪 40 年代磁重联模型被太阳大气活动领域的研究者首次提出至今,LTSTMR 耗散区的内磁能转移-释放-耗散、等离子体加热及高能粒子加速过程应如何进行,一直是困扰研究者的难题。其中精细结构演化中的很

多细节问题在理论上仍没有统一的普适理论,各种不同的观点同时存在,特别是在湍流的作用、高能粒子混合加速机制等方面尤为显著。本研究基于新型 HPIC-LBM 粒子算法,在天河 2 号平台上开展了 LTSTMR 的数值实验工作,通过对超

大规模数值模拟研究,实现了对包括太阳大气活动在内的 LTSTMR 问题进行三维精细结构演化过程的虚拟研究,并发现了其中存在的新物理图像。本研究的开展使得基于超级计算平台的数值模拟,同现有的理论分析以及地面空间观测一样,成为了研究 LTSTMR 问题的方法之一。

**致谢** 感谢国家超算广州中心的卢宇彤主任、杜云飞总工、刘羽老师、卢慧中老师等在运行平台和软件环境方面给予的支持和帮助。感谢美国 Los Alamos 国家实验室理论物理 T2 和 T5 的 Hui Li, Fan Guo 等给予的帮助和指点。感谢中国科学院计算网络信息中心迟学斌老师、刘利萍老师在计算资源方面给予的支持和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] PONTIN D I. Three-dimensional magnetic reconnection regimes: A review [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(9): 1508-1522.
- [2] YAMADA M, YOO J S, ALMONTE J J, et al. Conversion of magnetic energy in magnetic reconnection layer of a laboratory plasma[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4774.
- [3] PARNELL C E, MACLEAN R C, HAYNES A L, et al. 3D magnetic reconnection [J]. *Astrophysical Dynamics: From Galaxies to Stars Proceedings IAU Symposium*, 2010, 6 (S271): 227-238.
- [4] THURGOOD J O, PONTIN D I, MCLAUGHLIN J A. Three-dimensional Oscillatory magnetic reconnection [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 844(2): 1-12.
- [5] PARNELL C E, HAYNES A L, GALSGAARD K. Structure of magnetic separators and separator reconnection [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: A02102.
- [6] NAKAMURA T M, HASEGAWA H, DAUGHTON W, et al. Turbulent mass transfer caused by vortices induced reconnection in collisionless magnetospheric plasmas [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1582.
- [7] DAUGHTON W, ROYTERSHTEYN V, KARIMABADI H, et al. Role of electron physics in the development of turbulent magnetic reconnection in collisionless plasmas [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(7): 539-542.
- [8] MUÑOZ P A, JAIN N, KILIAN P, et al. A new hybrid code (CHIEF) implementing the inertial electron fluid equation without approximation [J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 224: 245-264.
- [9] FUJIMOTO K, SYDORA R. Plasmoid-induced turbulence in collisionless magnetic reconnection [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(26): 265004.
- [10] FUJIMOTO K. Studies on large-scale evolution of magnetic reconnection using full particle simulations with adaptive mesh refinement technique [D]. Kyoto: Kyoto University Japan, 2005.
- [11] FUJIMOTO K. Possible plasma instabilities and electron heating in the downstream region of the X-type neutral line [D]. Kyoto: Kyoto University. Japan, 2003.
- [12] FUJIMOTO K. Three-dimensional outflow jets generated in collisionless magnetic reconnection [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(20): 557-564.
- [13] ZHU B J, LIN J. Applications and Development in Particle-in-Cell Methods for Investigating Large-Scale Turbulent Magnetic Reconnection [J]. *Progress in Astronomy*, 2016, 34(4): 459-476. (in Chinese)  
朱伯靖, 林隼. 粒子云网格方法在大尺度湍流磁重联研究中的应用和进展 [J]. *天文学进展*, 2016, 34(4): 459-476.
- [14] ZHU B J. Application of supercomputing-based HPIC-LBM (hybrid particle in cell & lattice Boltzmann method) on magnetic energy dissipation mechanism in large scale turbulent magnetic [C] // Asis-Pacific Regional IAU Meeting. 2017.
- [15] CHENG H H, QIAO YC, LIU C, et al. Extended hybrid pressure and velocity boundary conditions for D3Q27 lattice Boltzmann model [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(5): 2031-2055.
- [16] ZHU B J, YAN H, YUEND A. Electron acceleration in interaction of magnetic islands in large temporal-spatial turbulent magnetic reconnection [J]. *Earth and Planetary Physics*, 2019, 3(1): 17-25.