

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.04.01

辐射磁流体力学数值实验研究 (代前言)

汪景琇¹, 袁 峰², 陈鹏飞³, 李 波⁴

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 250008; 3. 南京大学 天文与空间科学学院, 南京 210023; 4. 山东大学 空间科学研究院, 威海 264209)

摘要: 辐射磁流体力学 (RMHD) 是磁流体力学和等离子体物理学一个新的分支, 它研究与辐射有显著能量和/或动量交换的磁流体动力学行为。天体辐射磁流体力学描述天体等离子体在宏观尺度上的电磁相互作用、结构、辐射、动力学和爆发现象。“天体辐射磁流体力学”是中国科学院数学学部 2015—2016 年度所支持的一个学科发展战略研究项目, 其目的是评估这一生长中的学科分支的发展态势、国内外研究现状、适用的主要科学对象和发展战略, 重点设定在三维数值模拟研究, 或广义而言, 数值实验研究。为了推动 RMHD 三维数值实验研究, 这一专卷收入了天体物理学、太阳和空间物理学、受控等离子体实验等领域关于 RMHD 研究的部分调研和评述报告。

关键词: 天体物理; 太阳和空间物理; 辐射磁流体力学; 数值模拟

中图分类号: P182

文献标识码: A

宇宙中超过 99% 的重子物质由等离子体组成。空间和天体物理中观测到的大量现象都涉及等离子体物理学的原理和规律, 如天体发电机、太阳耀斑 (和恒星耀发)、粒子加速、恒星风、星系风、星冕和星系冕加热、黑洞的吸积和外流、恒星形成、行星形成、脉冲星辐射、伽马射线暴、黑洞撕裂恒星事件等。等离子体的微观行为是等离子体动力论的研究范畴。它用统计方法描述由带电粒子组成的多粒子体系, 描述粒子分布函数随时间的演化过程, 适用于对粒子加速及反常输运的研究。等离子体的宏观行为是磁流体力学的研究范畴。磁流体力学 (MHD) 把等离子体当作导电的连续介质来处理, 描述等离子体的宏观性质和运动、等离子体与磁场相互作用的行为, 通常被认为适用于处理动力学演化时空尺度远大于微观尺度 (如粒子回旋尺度或惯性尺度) 的等离子体。

等离子体物理和磁流体力学一开始就为太阳和空间物理学 (日球物理学) 观测研究所推动, 为理解天体和空间物理中的动力学和激变现象提供了一个主导性的理论构架。众所周知, 天体物理中的许多动力学行为和剧烈的活动现象都受磁场的驱动和控制; 天体的电磁辐射几乎都是偏振的, 需要完整的斯托克斯光谱 (由 I 、 Q 、 U 、 V 四个量描述) 给以描述。近年来,

收稿日期: 2016-11-25; 修回日期: 2016-12-16

通讯作者: 汪景琇, wangjx@nao.cas.cn

太阳磁场测量取得了重大的成就,在太阳活动周的长时标内,太阳全日面向量磁场为空基磁像仪系统观测,达到了前所未有的空间分辨率和偏振测量精度;而在恒星和行星层次,在银河系、星系乃至宇宙学层次,磁场观测都取得飞速的发展。磁场的作用体现在几乎所有天体物理对象之中。天体等离子体和磁流体力学的研究更加活跃。由于MHD过程总是伴随以磁流体或等离子体电磁辐射为形式的能量交换和对光子的吸收与散射,磁流体力学与辐射转移过程不可避免地耦合在一起,表现为辐射磁流体力学过程。辐射转移理论和磁流体力学作为天体物理学两大基础理论开始合璧出新。

辐射磁流体力学(RMHD)是磁流体力学和等离子体物理学的一个新的分支,它研究与辐射相互作用的磁流体的动力学行为,描述天体等离子体在宏观尺度上的电磁相互作用、结构、辐射、动力学和爆发现象。RMHD适用于辐射足够强、对等离子体具有不可忽视效应的磁流体环境。在这里,一方面磁流体可以通过产生或吸收电磁辐射获取或损失净能量,从而改变自己的动力学行为;另一方面,辐射和磁流体有时还可以通过动量交换,直接改变磁流体的运动状态。RMHD在天体物理学、空间科学和受控等离子体研究中有广泛的应用。

近年在天体物理学许多方面,辐射磁流体力学提供了观测解释、物理分析和数值模拟研究的理论基础。天体物理学中很多例证显示辐射磁流体力学的重要性。例如,温度为 10^7 K的热磁通量绳被认为是太阳系最剧烈的爆发——日冕物质抛射的驱动者^[1];原初行星盘的演化主要为渗透盘的外在磁通量的多寡所控制,同时与外部的紫外和远紫外的辐射相联系^[2];吸积盘中的磁转动不稳定性导致的磁湍流和磁场放大被认为是黑洞吸积盘中的角动量转移机制^[3];而星系际介质在宇宙再电离后对第一代超新星爆发的响应,被认为是宇宙种籽磁场增强和产生各向异性的机理^[4]。由于本质上的非线性和物理上多尺度耦合的特征, RMHD研究主要依赖数值模拟,三维数值实验成为RMHD和理论天体物理发展的一个必然趋势。

数值模拟作为与理论研究、观测研究和(实验室)实验研究紧密联系又互相补充的一个独立的研究手段,在所有基础研究领域都发挥着越来越重要的作用。在一定意义上,数值模拟可被认为是一种实验研究,即通过嵌入不同的物理过程和数学描述,选定最可能的物理参数,进行反复的计算试验,寻找对给定问题的最佳解和与观测实验的最佳拟合。因而,我们可以把数值模拟称为数值实验研究。

在天文学和天体物理学研究领域,数值实验研究尤为重要。毫无疑问,天文学是观测发现所驱动的科学。观测始终是天文学进步的不竭动力;理论赋予观测以灵魂,给设计观测以指导和提供理解观测的框架,不让观测退化成数据的杂陈与编目;而数值实验则成为连接观测和理论的桥梁,并且在理论依旧模糊而观测又难以企及之处,做出反复的试验,给出各种可能性的预见,寻找解决问题的途径。数值实验在解释观测数据、验证物理猜想和理论模型、预见新的可能性和物理规律等几个方面都显示出强大的威力。一个重大天文学观测设施常常耗资巨大,观测数据海量且纷杂,涉及的物理过程多重而纠结。在这种情况下,发展数值实验研究,建设一支好的数值模拟队伍,往往是基于重大设施的观测获取系统性原创成果的最有希望又最经济的手段。

2014年11月,中国科学院数理学部审议通过了汪景琇负责的“天体辐射磁流体力学”学科发展战略研究项目(2015—2016),拟对这一快速发展中的学科分支的发展态势、学科进

展和我们可能的努力做系统的调研、评估和分析。项目要求对相关学科, 如空间物理学和受控等离子体研究等也给以同样的关注。由于数值实验是研究的主要手段, 项目的重点理所当然放在了 RMHD 的三维数值实验研究上。承蒙《天文学进展》杂志的支持, 两年来这一战略研究的主要结果收入在这一专辑之中。

专辑中有六篇论文介绍 RMHD 数值模拟在天体物理学各几个重要领域的国际发展现状, 并对将来的发展做了可能的展望。实际上, 目前的天体物理学各主要领域的数值模拟研究, 除了宇宙学、大尺度结构形成的模拟主要采用 N 体模拟, 还没有系统 (但已经开始) 考虑 RMHD 之外, 其他主要研究方向的模拟研究, 都已经广泛采用 RMHD 流体模拟。这是由于, 随着研究的不断深入, 人们已不再满足于简单的解析, 或者不包含磁场以及辐射的纯流体动力学模拟, 加上数值模拟技术上的飞速发展, 人们已经有能力用 RMHD 模拟来研究这些不同领域中研究对象的形成、演化、动力学和辐射性质。在这六篇文章中, 白雪宁^[5]和余聪^[6]介绍了系外行星形成的数值模拟, 侧重点分别是行星形成早期的原行星盘的动力学以及尘埃动力学、行星形成晚期的主要过程如核吸积以及行星迁移。杨孝鸿^[7]介绍了国际上恒星形成的数值模拟研究。部德福和袁峰^[8]总结了不同类型的黑洞吸积模型下的吸积与外流, 重点强调了在这个领域近年来的两个重要进展, 即热吸积流中的风的问题以及超高吸积率下的吸积流的辐射问题。郭福来和袁峰^[9]则综述了活动星系核反馈的数值模拟研究, 这一反馈过程现在被广泛认为是我们理解星系如何形成与演化的关键过程。活动星系核反馈是一个相对比较年轻的领域, 不同的学者从不同的角度进行研究。这篇论文侧重于介绍喷流、风如何与星际介质相互作用从而解决星系团中的冷却流疑难问题。最后, 毛基荣和王建成^[10]则介绍了高能天体物理中普遍存在的、与小尺度湍动磁场相关的一些物理问题如激波、湍流、磁重联等问题的数值模拟研究进展。

这几个天体物理学领域中, RMHD 数值模拟正在起着越来越重要的作用。以黑洞吸积的研究为例, 近 20 年来的几个突破性进展全部都是通过 (R)MHD 数值模拟方法取得的。

太阳是唯一一颗能够被高精度、高时空分辨率和光谱分辨率观测的恒星。无论是宁静太阳大气还是剧烈太阳爆发现象, 其辐射均几乎跨越了电磁波谱的全波段, 而且在宁静太阳大气结构及爆发过程的动力学演化中, 辐射起到了至关重要的作用。当然, 由于太阳大气不同层次的温度及密度相差几个量级, 因此, 辐射在不同层次的现象中表现出千差万别的特征。例如, 在日冕中, 辐射近似为光学薄, 而在低层太阳大气中则表现为光学厚。即使同属低层大气, 光球层的辐射的处理可以采用局部热动平衡近似, 而色球及过渡区则表现出显著的非局部热动平衡。在本专辑中, 陈鹏飞等人^[11]详细介绍了过去 10 余年里太阳低层大气辐射磁流体力学数值模拟研究工作所取得的进展及其常用的数值方法, 并为我国开展相关的研究提出了一些建议。在过去十几年里, 低层太阳大气辐射磁流体力学数值模拟的文章呈线性增长的趋势。

在数值方法方面, 朱伯靖和林隽^[12]介绍了粒子云模拟方法在太阳辐射磁流体力学模拟方面的应用, 重点描述了该方法与普通差分数值模拟方法相比的优势及其在磁重联过程研究中的有效性。叶景等人^[13]则较详细地介绍了广泛用于磁流体力学数值模拟的 3 个开源程序, 包括 ZEUS, Athena 和 NIRVANA。

专辑中空间物理部分的两个评述报告均与太阳风有关。太阳风速度一般为数百千米每秒,它所填充的形状不规则的磁泡称作日球 (Heliosphere)。日球的尺寸在 100 天文单位 (AU) 量级,其形状和大小为太阳风与星际介质的相互作用所决定。在内日球 (日心距小于 1 AU) 研究中,新生太阳风的加热和加速问题重要但又悬而未决。RMHD 在太阳光球及色球等低层大气的能动力平衡中起着关键作用,而太阳风很可能起源于此,因而 RMHD 在新生太阳风研究中也扮演着重要角色^[14]。另一方面,日心距大于 1AU 的外日球层中,太阳风与来自星际的中性氢的耦合影响了太阳风的动力学性质,进而对日球边界物理有着重要影响。外日球物理学中, RMHD 在描述大尺度动力学和能量粒子加速及传输的多尺度耦合方面起着不可或缺的作用^[15]。

在磁约束聚变等离子体物理研究中,辐射是重要的能量损失机制,有助于降低磁约束装置关键部件的热负荷;但过强的辐射又会导致辐射不稳定性进而产生低模数的磁流体不稳定性,最终导致等离子体破裂。考虑到辐射的关键性,计入约束装置几何特征的 RMHD 数值模拟可在很大程度上推进密度极限等核心物理问题的研究^[16]。

我们欣慰地看到,辐射磁流体力学数值实验研究,在我国天体物理和空间科学领域已经起步,并开始取得有意义的进展。我们感谢为这一专辑做出贡献的各位作者,感谢《天文学进展》对专辑从组织到编辑出版做出的努力。期待在辐射磁流体力学数值实验研究领域,我国学者可以做出杰出的引导性的贡献。

参考文献:

- [1] Zhang J, Cheng X, Ding M D. *Nature Com*, 2012, 3: 747
- [2] Bai X N. *ApJ*, 2016, 821: 80
- [3] Balbus S A, Hawley J F. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70(1): 1
- [4] Schlickeiser R. *PRL*, 2012, 109: 1101
- [5] 白雪宁. *天文学进展*, 2016, 34: 370
- [6] 余聪. *天文学进展*, 2016, 34: 385
- [7] 杨孝鸿. *天文学进展*, 2016, 34: 477
- [8] 部德福, 袁峰. *天文学进展*, 2016, 34: 522
- [9] 郭福来, 袁峰. *天文学进展*, 2016, 34: 505
- [10] 毛基荣, 王建成. *天文学进展*, 2016, 34: 486
- [11] 陈鹏飞, 丁明德, 方成. *天文学进展*, 2016, 34: 403
- [12] 朱伯靖, 林隽. *天文学进展*, 2016, 34: 459
- [13] 叶景, 沈呈彩, 倪蕾, 等. *天文学进展*, 2016, 34: 532
- [14] 李波. *天文学进展*, 2016, 34: 415
- [15] 熊明, 李波. *天文学进展*, 2016, 34: 425
- [16] 蔡辉山. *天文学进展*, 2016, 34: 450

Numerical Experiments of Radiation Magnetohydrodynamics

—— In Lieu of a Preface

WANG Jing-xiu¹, YUAN Feng², CHEN Peng-fei³, LI Bo¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 250008, China; 3. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: The discipline of radiation magnetohydrodynamics (RMHD) is a newbranch in magnetohydrodynamics and plasma physics. It deals with the dynamical behaviors of magnetized fluids which have non-ignorableenergy and momentum exchange with radiation. Astrophysical RMHD describes the macroscopic electro-magnetic interaction, structure, radiation, dynamics, and explosive events in astrophysical plasmas. *The Radiation Magnetohydrodynamics in Astrophysics* is one of the strategicresearch projects on the development of scientific disciplines, supported by the Mathematics and Physics Division of the Chinese Academy of Sciences in 2015—2016. The project aims at evaluating the recent development and current status of this newly growing discipline, its applicable scientific subjects, and developing the proper strategy to boostits growth. The emphasis of this strategic project is put on the 3D RMHD numerical simulations, or in a broader sense, numerical experiments. In order to promote the RMHD studies we present this special issue in the journal of *Progress in Astronomy*. It contains the survey and review articles on the application of RMHD to astrophysics, solar and space physics, and confined plasma experiments.

Key words: Astrophysics; Heliophysics; radiation magnetohydrodynamics; numerical simulation