

天体物理和空间物理中辐射磁流体动力学数值模拟研究现状与展望

袁峰^{1*}, 陈鹏飞², 李波³

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;

3. 山东大学空间科学研究院, 威海 264209

* 联系人, E-mail: fyuan@shao.ac.cn

2017-08-07 收稿, 2017-10-16 修回, 2017-10-17 接受, 2018-01-09 网络版发表

国家自然科学基金(11633006, 11573051, 11661161012, 11533005, 41674172)、国家重点研发计划(2016YFA0400704)和江苏省 333 高层次人才培养工程(BRA2017359)资助

摘要 宇宙中超过99%的重子物质都是等离子体, 磁场在其中广泛存在且与等离子体相互作用. 另外, 辐射也往往对于这些等离子体的动力学起着重要影响. 因此, 完整描述这些等离子体的基本物理规律依赖于辐射磁流体动力学. 由于非线性以及物理上多尺度耦合的特征, 数值模拟在求解辐射磁流体动力学方程中起着重要的作用. 近年来, 由于技术及软硬件的快速发展, 数值模拟的作用越来越显著, 已经与观测、理论一起, 发展成为了3种主要的研究方法. 本文综述辐射磁流体动力学的数值模拟在天体物理(包含太阳物理)以及空间物理领域的研究现状, 并对未来的发展进行展望.

关键词 辐射磁流体动力学, 数值模拟, 天体物理, 太阳物理, 空间物理

宇宙中超过99%的重子物质由等离子体组成, 包括作为天体物理(含太阳物理)和空间物理主要研究对象的各种尺度下的天体, 如恒星、星际介质、星系、星系团等等. 因此, 天体物理以及空间物理中观测到的大量现象都是由等离子体的原理以及规律描述的. 按照从小到大的尺度, 这些现象包括行星形成、太阳耀斑、恒星形成、太阳以及恒星星风、粒子加速、黑洞吸积与外流、伽玛射线暴、黑洞撕裂恒星事件、超新星爆发、星系形成与演化、宇宙大尺度结构等等.

描述等离子体的原理和方法有两类: 一类着眼于等离子的微观行为, 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. 这种方法一般用于研究极小尺度上的微观物理过程, 如磁重联对粒子的加速等^[1]. 在大多数情况下, 我们只对宏观尺度(即远大于回旋半径等微观尺度)的行为感兴趣, 这时可以将等离子体看作连续介质, 用流体动力学(hydrodynamics, HD)或者磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)描述其整体动力学行为. 这样的处理方法被证明是等离子体动力论的很好近似.

等离子体中几乎总是包含磁场的, 在很多情况下磁场都具有重要的动力学作用^[2~4], 比如下文将要提到的高能天体物理中的一个基础性理论——黑洞吸积, 其中就因为磁场的存在而会出现一种“磁转动不稳定性”. 这一不稳定性是吸积盘角动量转移的主要机制^[5]. 另一个例子是日冕物质抛射与太阳耀斑,

引用格式: 袁峰, 陈鹏飞, 李波. 天体物理和空间物理中辐射磁流体动力学数值模拟研究现状与展望. 科学通报, 2018, 63: 371–384

Yuan F, Chen P F, Li B. Research progress and future prospect of radiative magnetohydrodynamics numerical simulations in astrophysics and space physics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 371–384, doi: 10.1360/N972017-00861

作为太阳物理中最主要的研究现象,它们也是太阳大气中磁活动性的结果.

除了磁场,等离子体中的辐射也经常对等离子体的动力学起着重要作用.辐射过程会与气体动力学耦合在一起,与气体进行能量、动量交换.更为重要的是,我们从宇宙中不同类型天体获得信息的主要渠道也是辐射.

考虑磁场以及辐射以后,等离子体的行为是由辐射磁流体动力学(radiation magnetohydrodynamics, RMHD)描述的.可以说, RMHD参与宇宙中不同尺度、不同类型天体的运动与演化规律,在天体物理和空间物理中都占据基础性的角色.然而棘手的是,描述RMHD的基本方程组是高度非线性的偏微分方程组,解析求解非常困难.因此,对这些方程组的求解主要依赖于数值模拟.

实际上,在天文学和天体物理学研究领域,数值模拟(或称为数值实验)研究尤为重要.一方面,毫无疑问,天文学是观测驱动的学科,观测始终是天文学进步的不竭动力;另一方面,理论也占据着不可或缺的同样的重要地位,给设计观测予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.目前的观测研究,仪器的分辨率越来越高,灵敏度越来越好,得到的数据越来越复杂.因此,单纯依靠相对简单的解析理论无法给出与复杂的观测数据相匹配的解释,我们必须依靠数值模拟,考虑各种复杂物理过程,严格求解方程组,才可能与精细的观测相匹配.

近年来数值模拟在解释观测数据、检验理论猜想与模型、预见新的可能性、设计新的观测等方面,都起着越来越重要的作用.究其原因,除了上面所述之外,还由于计算机硬件的飞速发展,以及由此带来的相应的计算数学、计算物理算法等软件方面的快速进步.这些都使得早年无法进行的大规模数值计算变得可行.由于这些原因,国际上著名的研究机构都根据此现状加强了数值计算天体物理的投入,如哈佛大学、普林斯顿大学,以及一些著名基金会等都成立了以计算天体物理为专门方向的研究团组.

具体到我们国家,近年来在天文和空间物理等领域的观测大设备发展很快.较之观测设备的发展,计算天体物理所需要的资金相对小很多,非常适合我们这样一个发展中国家.而且我们国家的整体计算机硬件水平也较高,这都是我们发展计算天体物

理的优势.另外,计算天体物理的发展对于提高天文观测设备的科学产出非常重要.基于这些原因,大力发展计算天体物理非常适合我们的国情.鉴于此,2014年底,中国科学院数理学部审议通过了汪景琇研究员负责的“天体辐射磁流体动力学学科发展战略研究项目(2015~2016)”,拟对这一快速发展中的研究方向的态势、进展和我们可能的努力做系统的调研、评估和分析.该战略研究项目的详细报告已经发表在2016年《天文学进展》杂志第34卷第4期上^[6]. 本文就是在这一背景下应汪院士要求撰写的.下面,我们将分别介绍国际上在天体物理、太阳物理和空间物理等研究领域中的辐射磁流体动力学发展情况,并对将来的发展进行展望.

1 天体物理方面的研究现状与展望

如前所述,天体物理中涉及辐射磁流体动力学数值模拟的研究方向较多.限于篇幅,在此以黑洞吸积为例进行着重介绍.选择这一课题的原因是黑洞吸积的数值模拟是目前天体物理中比较有代表性的、在天体物理数值模拟方面比较前沿的一个方向.在这一节,首先介绍黑洞吸积数值模拟的发展历史,然后以黑洞吸积外流为例,说明数值模拟这个强大工具对于深入黑洞吸积理论中这一重要进展起到的作用.实际上,近20年来该领域的主要进展几乎都与数值模拟有关.

1.1 黑洞吸积数值模拟发展简史

黑洞吸积领域的数值模拟工作开始于20世纪90年代初.受限于当时的计算机软、硬件条件,最初的数值模拟主要是二维的、不包含磁场以及辐射的.吸积盘的角动量转移是通过在流体程序中加入人工黏滞得以实现的^[7-9].此时的吸积盘模拟主要关注低吸积率的热吸积流^[10].一是由于这种吸积流辐射起到的动力学作用可以忽略,另外这种吸积流是几何厚的,即厚度与半径相当,这样模拟对分辨率的要求不高,技术上实现不是很困难.从20世纪90年代初至今,热吸积流的数值模拟一直是黑洞吸积数值模拟中最主要的研究对象.

吸积盘理论中一个核心问题是角动量的转移.20世纪90年代,通过线性分析, Balbus和Hawley^[11]发现,存在弱磁场和较差转动的吸积盘是“磁旋转不稳定”的.但该不稳定性的非线性发展很难继续用解析方法

进行研究. 为解决这一问题, Haeley等人^[12]和Stone等人^[13]创造性地将剪切盒模拟方法引入黑洞吸积盘研究. 该方法的本质是模拟吸积盘中的一个小的局部区域, 而不是整个吸积盘. 这样做的好处是可以达到较高的分辨率, 从而细致地研究有关物理过程. 研究发现, 该不稳定性的非线性发展导致了磁场的放大以及湍流的产生. 磁流体动力学湍流成为目前公认的吸积盘中的角动量转移机制. 由于两位学者对吸积盘理论的重要贡献, 他们共同获得了2013年的邵逸夫天文奖.

之后, 人们开始考虑吸积盘的整体磁流体数值模拟^[14-17]. 但这时考虑的基本是几何厚、光学薄的热吸积流, 不需要考虑辐射的动力学作用.

吸积流的数值模拟随后在两个方面一起发展. 一个方面是考虑辐射转移. 对于冷吸积流, 包括标准薄盘以及超爱丁顿吸积流, 与热吸积流不同, 辐射起着重要的动力学作用, 数值模拟必须加以考虑^[18]. 当时考虑辐射转移的数值模型是牛顿力学框架下的两维磁流体. 光子场是频率积分的, 且在处理辐射转移时采取了流量限制扩散近似. 另一个方面是广义相对论框架下的磁流体动力学数值模拟. 这是因为, 黑洞附近引力非常强, 对于某些问题(如喷流形成), 必须考虑广义相对论效应^[19,20].

2010年以后, 黑洞吸积盘的数值模拟有了跨越式发展, 程序的功能大大增强. 目前黑洞吸积方面最先进的程序是考虑辐射转移的三维磁流体动力学程序, 代表性的程序有两个. 一个是由普林斯顿大学Stone教授小组^[21,22]开发的Athena程序. 这个程序是三维的、磁流体动力学的、兼有非相对论以及广义相对论框架下的、解频率积分的光子辐射转移的程序. 该程序中, 频率积分的光子场的辐射转移是被直接求解的, 这种处理辐射转移的方法是当前国际上最精确的. 另一个是由哈佛大学小组基于HARM(high accuracy relativistic magnetohydrodynamics)^[20]开发的, 如HARMRAD. 该程序是三维的、广义相对论的、磁流体动力学的、解频率积分的光子辐射转移过程的程序, 处理辐射转移时采用了M1近似(辐射矩闭合方法^[23,24]). 这种处理辐射转移的方法不如前一种方法精确, 优点是计算量小一些.

1.2 黑洞热吸积流中的风

近年来吸积流中的风的问题是该领域中最重要、也是黑洞吸积领域近年来最主要的研

究进展. 热吸积盘中产生风的研究可追溯到1999年. Stone等人^[7]在这一年发表了第一篇黑洞吸积的整体数值模拟的论文. 在该文中, 作者计算了吸积流的质量内流率, 外流率和净吸积率. 作者发现, 质量内流率和外流率都随着半径的减小而降低, 质量外流率和内流率可以近似看作半径的幂律函数. 这是个很令人吃惊的结果, 因为以前的解析研究几乎无一例外全都假设黑洞吸积的质量吸积率不随半径变化. 为解释这一数值模拟结果, 国际上两个著名的研究组提出了两个截然不同的模型. 这两个模型分别为美国科学院院士、斯坦福大学Blandford教授与合作者^[25]提出的ADIOS(automated data inquiry oilspills)模型, 以及美国科学院院士、哈佛大学Narayan教授与合作者们^[26]提出的CDAF(convection-dominated accretion flow)模型. 在ADIOS模型中, 作者假设由于风的存在, 使得吸积气体逐渐损失, 导致吸积率随着半径减小而减小. 他们基于此假定得到了ADIOS模型的自相似解. CDAF模型的建立是基于热吸积流是对流不稳定的这一假设. 对流不稳定性会导致吸积流中形成一系列的对流元胞. 随着吸积流向内运动, 越来越多的气体会被锁在对流元胞中而没有被吸积进入黑洞, 这导致了吸积率随半径的变化. 这两个模型相互竞争了十几年的时间, 期间邵逸夫天文奖获得者Hawley教授、普林斯顿大学的Stone教授等著名吸积盘专家也都加入了对该问题的讨论, 但一直没有得出明确的结论.

ADIOS和CDAF哪个模型正确? Yuan等人^[27]运用磁流体动力学数值模拟方法, 对这一问题进行了研究. 研究这一问题的困难在于, 吸积流是强烈湍动的. 或者是由于磁转动不稳定性, 或者是由于对流不稳定性导致的湍流. 湍流显然也总是有向外运动的成分存在, 因此, 如何区分湍流与真正的外流是问题关键. 为此, Yuan等人^[27]计算和比较了外流和内流的各种统计上的物理性质, 如温度、径向速度、转动速度、熵等等. 他们的想法是, 若流体运动是湍流主导, 则统计上看, 这些物理性质应该是相同的. 反之, 若差别很大, 则表明并非湍流主导, 而是存在真正的外流. Yuan等人^[27]的研究发现, 外流和内流的性质差别非常大. 这表明系统性的外流存在, 而且很显著. 他们还研究了含磁场的吸积流的对流稳定性, 发现吸积流是对流稳定的, 也就是说CDAF模型的基础假设存在问题. 基于这两方面的原因, Yuan等人^[27]得出结

论, 存在较强的外流, 吸积率随半径的变化原因在于外流而不是对流, 即ADIOS模型是正确的. 这一研究解决了黑洞吸积的一个基本问题, 结束了在该问题上的争论. 巧合的是, 这一理论研究结果第二年被发表在*Science*杂志上的Chandra望远镜的观测完全证实^[28].

Yuan等人^[27]的研究并没有给出定量的风的质量流、速度等详细的物理性质, 而这些性质对于我们研究一些问题比如活动星系核反馈非常重要. 这一研究的困难之处在于如何将湍流的外流与真正的外流区分开. 2015年, 基于三维磁流体数值模拟结果, Yuan等人^[29]提出了虚拟粒子轨迹线方法, 用这一方法能够基于数值模拟数据得到气体粒子的运动轨迹线, 从而直观地得到气体粒子是做湍动运动还是系统性的外流, 结果如图1所示. 这样就可以将湍流与真正外流区分开. 基于此方法, 除了得到了风的各种物理性质外, Yuan等人^[29]还研究了风产生的具体物理机制.

1.3 超爱丁顿吸积

比起解析研究, 数值模拟技术除了能够处理更高的维度外, 另一个优势是它能够研究更加全面、详尽的物理内容, 比如可以包含磁场、湍流、对流等复杂的物理过程, 因此就可能发现一些一维解析研究没有发现的新物理过程. 这一部分将要介绍的超爱丁顿吸积中的光子在垂直于盘面的“磁浮力”传输机

制即是一个例子.

超爱丁顿吸积的研究始于20世纪80年代, 早期的模型是一维、解析的. 一个重要假设是, 光子在吸积流中是通过扩散方式传播的. 另外, 如同时代所有的解析的黑洞吸积工作一样, 该工作没有考虑外流. 早期工作最重要的发现是所谓的“光子囚禁”或者“能量平流”(advection)效应. 当吸积率很高时, 吸积流的密度大大增加, 导致光子沿着盘的竖直方向通过扩散逃逸出吸积流的时标大大增长. 这样, 这些光子可能来不及逃逸出吸积流, 就随着吸积流的径向运动落入黑洞视界, 这种效应称为能量平流或者光子囚禁. 这就导致这种吸积流的辐射效率和标准薄盘相比大大降低. 在此模型框架下, 人们计算了辐射光度随着吸积率的变化关系, 发现随着吸积率的增长, 辐射光度增长较慢, 即不是呈线性增长, 而是随着吸积率的对数增长.

近年来, 随着黑洞吸积领域数值模拟研究的飞速发展, 对于超爱丁顿吸积这种必须考虑辐射转移的吸积盘的模拟也终于能够得以实现, 这样就可以检验以前的简单的解析模型是否正确. 这方面工作有代表性的包括日本国立天文台^[18]以及美国普林斯顿大学^[22]、哈佛大学^[30]的几个小组的工作. 这些工作中, Jiang等人^[22]严格求解辐射转移方程, 因此他们对于辐射转移的处理最为精确. 他们计算了一个吸积率为200倍爱丁顿吸积率的例子, 得到的吸积流的结构见图2. 与以前的解析模型对比, 他们发现存在一些很大的不同. 一是存在很强的外流, 吸积率随着半径变化. 更重要的是, 对于如此高的吸积率, 他们发现, 吸积流的辐射效率几乎与标准薄盘的效率相同, 远高于以前超爱丁顿吸积的一维解析模型的预言. 关于产生这一差异的物理原因, 他们发现除了以前模型中考虑过的光子扩散之外, 还存在一种新的能量传输方式, 即光子在吸积盘的竖直方向上的能量平流. 这一新的传输机制是由于吸积流中存在磁浮力导致的, 它比光子扩散要更加有效. 这导致了光子囚禁效应不再那么占主导地位, 因此辐射效率大大提高.

与Jiang等人^[22]的结果相比, 哈佛小组的工作^[30]存在两个主要的差异. 一是他们的程序是建立在广义相对论的基础之上, 这方面比起Jiang等人^[22]的计算有其一定的优势. 不过在辐射转移的处理上, 他们用的是前文介绍的“M1闭合算法”的方法. 与Jiang等

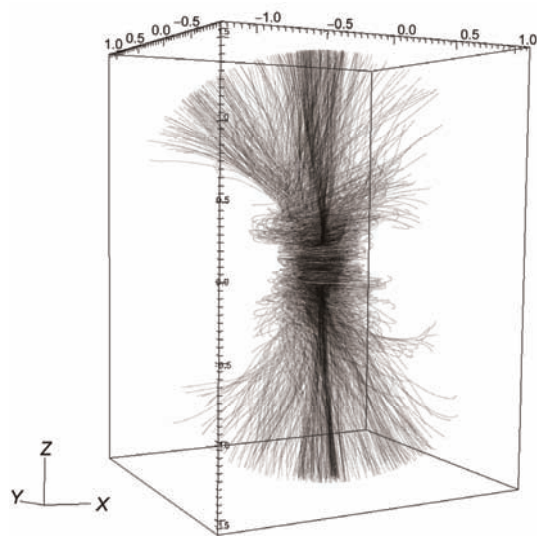


图1 基于数值模拟数据, 用轨迹线方法得到的三维黑洞吸积气体粒子轨迹线^[29]. 可以清楚地看出风的存在

Figure 1 Trajectories of gas particles in accretion flows obtained from 3D numerical simulations^[29]. The existence of wind is evident

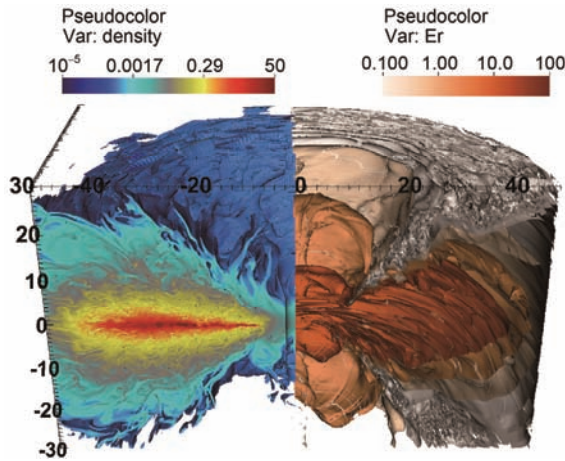


图2 (网络版彩色)三维辐射磁流体数值模拟得到的黑洞的超爱丁顿吸积流的质量密度(左)以及能量密度(右)的结构^[22]

Figure 2 (Color online) Spatial distributions of mass density (left) and energy density (right) for a super-Eddington accretion flow obtained from a 3D RMHD simulation^[22]

人^[22]的方法不同,该方法只是求解辐射场的第一个矩,因此,该方法不如Jiang等人^[22]的处理方法准确,尤其在靠近转轴的位置对辐射场的处理不够准确.与Jiang等人^[22]相似,他们也发现存在很强的外流,而且也发现了磁浮力导致的光子在吸积盘竖直方向上的新的能量传输机制.不同之处是,他们发现,在靠近吸积盘赤道面附近,光子囚禁效应比Jiang等人^[22]预言的更为重要.目前上述两个课题组结果差异的原因还在研究之中,但是目前的工作都表明,以前的一维解析的超爱丁顿模型看来存在较大的问题.这些结果清楚地表明了进行辐射磁流体数值模拟的重要性.

1.4 对将来黑洞吸积数值模拟发展的展望

如前所述,目前的辐射磁流体动力学数值模拟能够在三维、含辐射转移的、广义相对论框架下进行.这些计算技术在天体物理各领域中是比较先进的.下一步的发展主要从两个方面展开.一是考虑重要的微观物理过程.这方面的例子是粒子加速以及等离子体加热机制,如磁重联对粒子的加速与对等离子体的加热.这对于基于数值模拟理解观测结果有重要作用.比如,磁重联加热决定了吸积流中的电子温度,进而决定了辐射.磁重联对粒子的加速对于理解一些短时标的光变(如黑洞吸积盘的闪耀等)至关重要.粒子加速问题涉及微观尺度的过程,无法用磁流体近似来研究,必须用动力论.如何将极小尺度的

结果考虑进大尺度的磁流体数值模拟,是将来需要研究的一个重要问题.

二是将来的发展涉及吸积盘辐射谱的计算.目前的磁流体数值模拟计算的是将光子频率进行了积分以后的光子场的总能量密度,因此无法得到辐射谱.为解决这一问题,目前国际上有学者采用蒙特卡罗方法.他们首先用MHD数值模拟计算吸积盘的流体力学,得到吸积盘的物理量分布(例如密度和温度随半径的变化),之后根据这些结果将吸积盘的各个物理量放入蒙特卡罗模拟中,计算吸积盘的出射谱^[31].类似的基于模拟数据进行“后处理”的方法也被用于非平衡电离态的计算^[32].这种做法假设了辐射对于动力学影响不大,即动力学与辐射是脱耦的.这一假设对于某些类型吸积盘,如吸积率比较低的热吸积流,是很好的近似.但是对于吸积率较高的吸积流,辐射比较强时,辐射往往与动力学耦合在一起,这种近似就存在严重问题.基于以上原因,目前国际上已开始开发直接求解与频率有关的辐射转移方程的程序.

2 太阳物理方面的研究现状与展望

太阳是距离人类最近的恒星,也是唯一一颗我们可以获得高时空及高光谱分辨率观测的天体.不断更新的观测设备为我们揭示了太阳大气中越来越精细的结构与动力学,这些丰富的观测特征为辐射磁流体动力学数值模拟提供了广阔的舞台.正因如此,在过去的20多年里,太阳辐射磁流体动力学数值模拟方面每年发表的文章几乎呈线性增长,数值模拟正在发挥着越来越重要的作用^[33].

2.1 辐射在磁流体动力学数值模拟中的必要性

数值模拟在太阳物理领域已经应用了50余年.在过去的大部分数值模拟工作中,受限于计算硬件的能力,MHD方程组经常被简化,尤其是能量方程中的辐射项通常被忽略.然而,辐射在太阳物理过程中非常重要.考虑辐射的必要性表现在以下两个方面.

(i) 电磁波辐射是我们诊断太阳大气爆发过程的主要手段.我们除了可以对太阳风及爆发过程加速的部分高能粒子在其传播到卫星所在位置之后进行就地测量以外,辐射是探测太阳爆发现象的主要方式.然而,通常的数值模拟为我们提供的仅是密度、温度、速度等物理量.这与实际观测之间存在是

否具备直接可比性的问题. 在很多过程中, 辐射最强的结构特征并不对应密度或温度最高的区域. 只有通过反演(由观测推算密度温度等物理量)或正演(在模拟中考虑辐射或利用密度等物理量计算辐射)才能搭起观测与数值模拟之间的桥梁.

(ii) 辐射会严重影响等离子体的动力学行为. 在太阳大气演化过程中, 虽然辐射产生的压力远远不及洛伦兹力, 因此辐射对动力学的直接影响可以忽略, 但是辐射在能量传输方面却占了举足轻重的地位. 无论是在光学厚的太阳低层大气还是在光学薄的日冕中, 辐射过程都可以通过能量的传输来改变等离子体密度和温度分布, 从而间接影响物质的动力学行为. 以波的传播为例, 在绝热情况下, 声波沿着重力方向传播时存在一个截止频率, 低于此频率的声波无法往上传播. 这一特点被广泛用来解释为什么在黑子本影处光球层存在周期为5 min的 p 模波, 而在其上方的色球层则表现为3 min的周期性振荡^[34]. 为了解释在低日冕观测到的5 min振荡, De Pontieu等人^[35]提出倾斜的磁场会降低截止频率, 从而使得光球层的5 min p 模波得以泄漏到日冕^[36]. 可是, 观测也显示有些竖直磁场结构也伴随5 min p 模波的泄漏. 一种可能的机制是Roberts^[37]提出来的想法, 即辐射可能改变截止频率的大小. Khomenko等人^[38]利用二维辐射MHD数值模拟证实了该想法, 发现光球层的辐射确实能有效降低截止频率的大小, 从而使得5 min p 模波得以沿着竖直的磁力线往上传播.

2.2 考虑辐射的常见方式及常用的程序

鉴于不同情况下辐射过程的差异以及能量方程中辐射项与其他项相比或小或大, 我们对辐射的处理方式也各有不同. 根据从易到难的程度, 大致可分为4类.

(i) 辐射图像合成. 当辐射冷却(或加热)时标与爆发时标相比大很多时, 辐射项可以在数值模拟的能量方程中忽略不计. 此时, 为了将模拟结果与观测相比较, 我们可以利用一些原子数据库(如SASAL和Chianti^[39,40]), 将数值模拟的密度、温度等物理量合成其多波段的辐射图像^[41,42]及光谱^[36]. 此类辐射图像或光谱的合成方法也常用于下面要介绍的光学薄辐射的情况.

(ii) 光学薄辐射. 当等离子体比较稀薄(如日冕)以致于光学深度比较小时, 辐射项可以采用光学

薄近似. 此时, 辐射项表示为电子密度、离子密度以及一个只与温度有关的辐射函数的乘积. 一个典型的应用即是日珥(或称暗条)的形成过程, 其中一个重要的形成机制为辐射不稳定性, 辐射在其中起着至关重要的作用. 值得庆幸的是, 在日珥的形成过程中(即日冕物质温度由200万度左右降低至数千度), 其伴随的辐射可以认为是光学薄的. 因此, 该近似被广泛用于相应的数值模拟中^[43,44]. 顺便提及, 日珥形成之后, 其冷核变为光学厚^[45].

(iii) 考虑局部热动平衡的辐射转移. 当光学厚度增加, 光学薄近似不再有效, 就有必要考虑辐射转移, 即数值求解如下辐射转移方程

$$\frac{dI_v}{d\tau_v} = S_v - I_v. \quad (1)$$

不过, 若等离子体非常致密(如低层太阳大气中的光球层), 粒子之间的碰撞非常剧烈, 以致于在动力学时标内等离子体很快达到局部热动平衡. 此时, 公式(1)中的源函数 S_v 可以由普朗克函数近似^[46], 这大大简化了数值模拟的难度.

(iv) 考虑非局部热动平衡的辐射转移. 在低层太阳大气中的色球与过渡区发生的一些活动现象中, 温度、密度等物理量变化剧烈, 等离子体局部无法达到热力学平衡状态, 一些重要谱线(如H α 和Ly α 等)的计算需要考虑非局部热动平衡, 而不是简单地采用萨哈公式来计算电子在各能级的分布^[47].

天文界同行有很多开源的MHD数值模拟程序, 譬如AMRVAV^[48], Athena^[21], Flash^[49], NIRVANA^[50], ZEUS^[51], PENCIL^[52]等. 这些程序大多也包含光学薄辐射(即使源程序不包含辐射, 用户将光学薄辐射加入程序也比较容易做到). 涉及辐射转移计算模块的程序目前大多限于各研究组内部及其合作者使用, 譬如一维的RADYN^[53]和三维的MURaM^[46]、Bifrost^[47].

2.3 若干重要问题的进展

在过去的40余年里, 辐射MHD数值模拟在解释宁静太阳和活动太阳诸多现象的观测特征及动力学行为方面取得了很大的成功. 其中影响比较广泛的包括如下一些问题.

(i) 重要谱线的形成. 太阳光谱观测中有几条非常强而且非常重要的谱线, 对这些谱线形成机制的理解能够揭示太阳大气的精细模型. 譬如, Leenaarts

等人^[54]的研究表明: (1) 三维辐射转移对氢的谱线形成至关重要; (2) $H\alpha$ 在色球高层的不透明度主要取决于密度, 受温度影响较弱; (3) $H\alpha$ 线心强度与形成高度有关, 即形成高度越高则强度越低; (4) $H\alpha$ 线心宽度反映了形成区的温度, 且不需额外的微观湍流即可解释观测到的线心宽度。

(ii) 低层大气结构. 色球结构的能量平衡主要受几条强线的影响, 如 $H\alpha$ 和 $Ca II 8542 \text{ \AA}$ 等^[55]. Leenaarts等人^[56]在考虑非平衡电离之后发现: 色球层氢的电离度变化比较缓慢, 电离度在激波经过时变化不大, 在激波过后降低也不多. 色球纤维清晰可见的原因是其 $H\alpha$ 不透明度比较高. 他们后来的模拟显示有些色球纤维示踪磁力线, 有些则不然^[57]. 众多的数值模拟表明非平衡电离会影响太阳低层大气的结构, 有可能解释以往局部热动平衡大气模型与观测之间存在的矛盾^[58].

新一代射电望远镜ALMA为诊断色球结构提供了新的手段, 其中1 mm辐射能够给出中、低色球层的详细结构, 包括激波在其中的传播. 利用辐射MHD数值模拟可以对射电辐射进行正演, 以加强对观测资料的理解和信息挖掘^[59].

(iii) 低层大气磁重联. 太阳低层大气磁重联被用来解释II类白光耀斑和埃勒曼炸弹等众多爆发现象^[60]. 最近的数值模拟研究表明磁场较弱时磁重联导致的小幅度温度升高能解释埃勒曼炸弹, 而磁场较强时则可解释IRIS卫星观测到的约 $8 \times 10^4 \text{ K}$ 的高温增亮^[61].

(iv) 日冕加热问题. 日冕加热所需要的磁能耗散要么是交流的, 要么是直流的, 对应的加热机制分别是阿尔文波和纳耀斑. 辐射MHD数值模拟在这个课题的研究中大有用武之地. 以往的主流观点经常在这两种机制之间摇摆. 一部分同行坚持阿尔文波加热模型^[62-64], 另外一些辐射MHD模拟的结果则显示太阳表面对流运动导致日冕磁力线的交所产生的电流片的耗散也能将日冕加热到一二百万度的高温^[65]. 一方面, 我们可能需要更高时间分辨率的光谱观测来对不同的模型做出甄别, 另外一方面, 也许阿尔文波和电流片的耗散(即纳耀斑模型)都对日冕加热有贡献, 只是在日冕的不同结构中两者所占比例不同. 这些有待于不断改进辐射MHD数值模拟并与观测进行比较.

(v) 冕环的形成. 冕环是组成日冕的结构单

元. 通常认为冕环示踪了我们看不见的磁环, 不过冕环的截面积沿环几乎无变化, 这与外推出来的磁环并不一致. Peter和Bingert^[66]通过辐射MHD数值模拟表明冕环的常截面积特性是由极紫外辐射对不同温度具有不同的响应所致. 最近, 他们进一步指出虽然每个时刻冕环可能示踪了磁力线, 但磁力线可能在不断演化移动, 而冕环则维持在比较稳定的位置^[67].

定性半定量的解析分析可以得到冕环中压强、环长与温度之间的标度率, 这里包含了很多近似. 而三维辐射MHD数值模拟则可以得到更为准确的标度率, 为研究太阳乃至恒星冕环提供重要的指导^[68].

(vi) 暗条的形成. 暗条亦称为日珥, 是悬浮于日冕中的低温高密度物质团, 由很多细丝组成, 其温度比百万度的日冕低2个量级, 密度则高2个量级. 虽然偶尔有人提出部分暗条是由太阳内部浮现而成, 更多的观测显示色球物质注入^[69]和日冕凝聚是两种主要的机制, 其中日冕凝聚则是辐射MHD数值模拟的理想课题.

由于暗条的结构单元是细丝, 因此, 最简单的处理方式是采用一维辐射流体动力学数值模拟^[43,44,70]. 自2012年开始, 暗条的形成开始拓展到二维乃至三维辐射MHD数值模拟^[71,72], 如图3所示. 这些模拟结果解释了暗条的诸多观测特征, 但也存在一些亟待解决的问题, 如模拟中的冷却时标与实际观测之差异^[73].

除了本节简述的6个问题之外, 太阳辐射MHD数值模拟还有很多重大课题, 譬如黑子和黑孔的形成、宁静区的磁流浮现、小尺度磁场的分布、大气中磁流体波的传播、局部发电机理论、色球加热、色球大气模型等等(参见陈鹏飞等的综述文章^[33]), 这里就不再赘述.

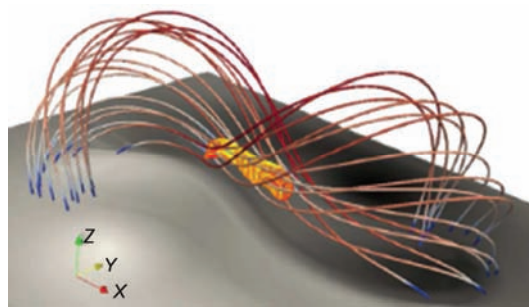


图3 (网络版彩色)暗条形成的三维辐射MHD数值模拟^[72]

Figure 3 (Color online) Filament formation obtained from a 3D RMHD simulation^[72]

2.4 太阳辐射磁流体动力学数值模拟展望

分辨率日益提高的太阳多波段观测为辐射MHD数值模拟提供了丰富的课题和广阔的舞台. 在如下3个方面, 数值模拟将发挥着举足轻重的作用: (1) 解释观测特征; (2) 检验已有的理论模型; (3) 提出新的理论模型. 数值模拟作为一种研究手段, 将极大地弥补解析理论的不足, 并与多波段观测取长补短, 为我们理解纷繁复杂的观测特征及揭示深藏在这些现象背后可能极其简洁完美的物理规律提供重要的保障. 以极具挑战的课题“过渡区与日冕磁场的测量”为例, 辐射MHD数值模拟能够为这些区域磁场的诊断提供不可或缺的参考^[74].

3 空间物理方面的研究现状与展望

空间物理学着重研究人造飞行器所能就地(*in situ*)探测的区域中发生的物理过程. 由于Voyager-1飞船很可能已穿越了日球边界^[75], 目前通常认为空间物理学大致与日球物理学等价. 日球是太阳风与星际介质相互作用而形成的尺度在100天文单位(AU)量级的形状不规则、由磁化太阳等离子体填充的区域^[76].

在日心距大于1 AU的外日球中, 星际中性原子选择性地吸收遥远恒星大气的辐射并且共振散射太阳直射光, 它与太阳风一价正离子之间的电荷交换还可以产生能量中性原子(energetic neutral atom, ENA)辐射. ENA辐射携带其原属离子群的成分及能量信息并且在日球层内直线运动, 可以充当广袤日球层的远程探针, 它在全天图范围内的成像能描绘外日球层在粒子多能段的全景肖像. 太阳风动力学与白光被动散射是完全解耦的, 但它与ENA主动辐射是强烈耦合的. 如果将ENA辐射视作广义辐射, 那么辐射磁流体动力学(RMHD)的概念也可以延拓到外日球大尺度动力学研究中, 换言之, 可以将太阳风以磁流体来处理、而将中性氢原子以流体或动力学理论来描述, 从而构成外日球层的“磁流体-粒子”耦合模式. 这类广义的辐射磁流体研究在外日球太阳风的减速和加热、日球边界的大尺度结构、外日球异常宇宙线等重要科学问题中都有着重要的应用^[77].

限于篇幅, 本文仅讨论经典意义下的RMHD在太阳风起源研究中的应用. 我们将看到, 由于太阳风起源于低层太阳大气, 其RMHD建模研究也与低层太阳大气的RMHD数值建模有着密切联系.

3.1 内日球太阳风研究对辐射磁流体动力学的内禀需求

内日球(日心距小于1 AU)太阳风研究中, 太阳风的起源问题占据着重要地位, 因而成为2018年将发射的Solar Orbiter和Parker Solar Probe两个国际计划的首要科学目标. 这一起源问题包括源区的认证以及初生太阳风由数km/s加速至数百km/s的机制两个层面^[78].

就源区认证而言, 目前通常认为近地质子流速超过600 km/s的高速流主要来自冕洞, 而低于400 km/s的低速流的源区则很广泛: 冕洞-冕流的边界、宁静区、活动区边界等都可能是其日冕源区. 而就初生太阳风加速而言, 通常认为它是太阳风质子加热的后果, 且这类加热在近日区更倾向于垂直磁场方向, 质子平行与垂直温度的差异所导致的镜力(mirror force)很可能有效地导致质子克服太阳引力从而进入行星际空间. 整合“源区认证”与“初生太阳风加热加速”两个问题的现有认识, 人们提出了太阳风物质供应的两类图像^[79]. 一为“波动湍流说”, 它认为太阳风源自扎根于光球的开放磁管, 对流层无规运动对磁管足点推挤所造成的波动及后续发展的强磁流体湍流是太阳风加热的主要来源. 另一为“开闭磁场耦合说”, 它认为开放磁场与磁环的重联释放出环内物质并为之提供能量, 环内物质沿新形成开放力线的流动即为太阳风, 而波动/湍流在其后续加热中也会起重要作用.

无论哪类图像, 太阳风起源的物理机理研究都常常包括: (1) 物质与能动量输运的描述; (2) 波动/湍流输运的描述; (3) 波动/湍流与太阳风各组分间的互反馈. 作为太阳风介质能量的重要损失机制, 辐射在太阳风的热力学性质演化中起着重要作用, 因而有必要纳入到太阳风机理的研究中. 此外, 从构造数据驱动的实时太阳风模型的角度, 辐射也有必要考虑在内: 底部观测数据中, 无论是磁场还是流场, 往往都是光球观测所得, 这意味着光球、色球、过渡区、日冕而至太阳风各圈层间的耦合需要自洽处理, 而辐射在耦合中起着重要作用.

3.2 辐射磁流体动力学在太阳风数值建模中的典型应用

太阳风数值模型中, 辐射处理的复杂程度取决于计算区域的底部边界如何选取. 如果该边界选在温度约数万度的色球顶或者数十万度的过渡区, 那

么计算区域中辐射是光学薄的. 如果计算域的底边界选在光球, 那么电子的能量方程中需要考虑光学厚辐射损失.

Matsumoto和Suzuki^[80]构造了目前仅有的部分计入光学厚辐射的多维太阳风模型. 其基本物理思路来自“波动/湍流说”, 在底边界(取为色球)引入符合观测约束的宽频阿尔芬波, 利用波在结构化介质中的传输及耗散来加热太阳大气, 从而在开场区生成太阳风. 该模型为2.5维, 换言之, 所有物理量仅与径向与经向有关, 但流速及磁场两个矢量都存在纬向分量. 该模型计入了重力、辐射损失以及磁场的高度结构化等现实特征, 以初边值问题的角度来寻求给定边界条件下的太阳大气及太阳风的准稳态解, 该准稳态解由图4给出. 图中背景实线勾勒了开场区磁场位形, 其漏斗状结构符合冕洞中太阳风源区的现有认识^[81]. 由图4(a)可见, 底边界所引入的阿尔芬波的耗散可以平衡辐射损失并进而产生百万度高温的日冕, 最终驱动太阳风. 图4(b)只显示了高度约20 Mm之下的近日区部分, 结果表明在这一高度范围, 新生太阳风速已可达每秒数十千米. 事实上, 该文将计算区域的顶边界选择在7 AU开外, 该处风速可达约800 km s⁻¹, 与高速流观测相符.

除可能作为太阳风数值模型的有机组成外, 辐射还常充当太阳风数值模型计算的后处理产品. 换

言之, 这种正演的思路以磁流体计算结果作为输入, 以白光、紫外、射电等波段的辐射强度或谱线轮廓作为输出. 一方面, 这些“合成”观测量与观测的直接对比, 可用来评估日冕和太阳风加热机制的可行性^[82,83]. 另一方面, 将这些合成量作为观测输入, 利用标准诊断方法进行反演, 而后将反演结果与磁流体数值模拟的计算结果这一“真值”对比, 还可用来评估现有诊断方法的可靠性^[84].

3.3 内日球太阳风之辐射磁流体动力学数值建模的展望

就内日球太阳风数值模拟研究的进展而言, 现有磁流体模型已进入全三维、以实时光球磁图作为底部边界输入、可以计入多组分特性的阶段, 并可以较为细致地考虑波动/湍流与太阳风组分的互反馈^[83,85]. 然而, 需要指出的是, 现有太阳风模型中辐射的处理都还是比较简单的, 没有例外地都采用了经验而非物理的方式, 自洽考虑辐射转移效应的模型还有待构建. 事实上, 既然太阳风很可能是太阳大气加热的自然后果, 那么自洽处理太阳风数值模拟研究中的辐射问题与低层太阳大气数值模拟中的辐射处理会面临同样的困难. 一个具有挑战性的目标当然是能利用某种机制(例如重联或波动/湍流), 以光球观测作为底部边界输入, 自洽地处理辐射转移问题, 最终自

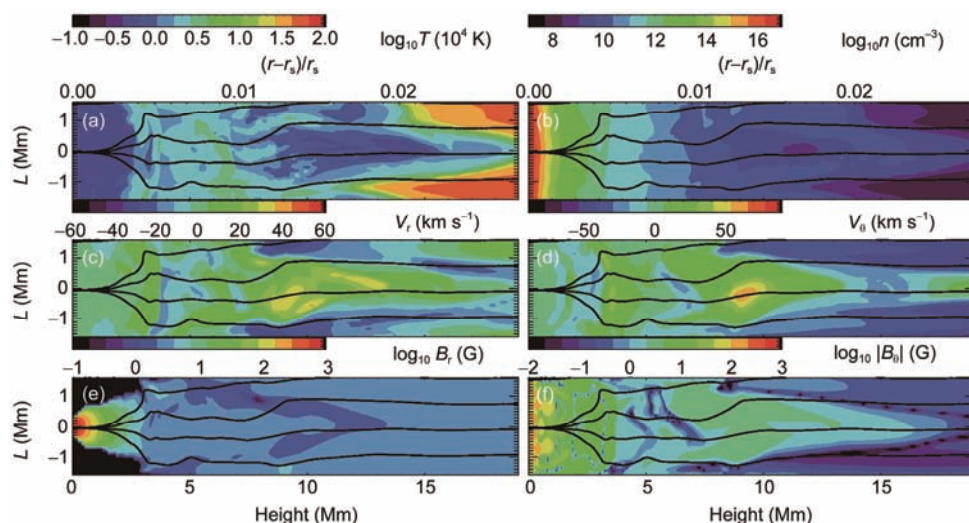


图4 (网络版彩色)部分计入光学厚辐射的阿尔芬波驱动的2.5维太阳风数值模型. 图中给出了近日区温度(a)、数密度(b)、径向流速(c)、纬向流速(d)、径向磁场(e)及纬向磁场的空间分布(f). 这里横轴代表径向, 纵轴代表经向^[80]

Figure 4 (Color online) A 2.5D Alfvén-wave-driven solar wind model that partly addresses optically thick radiation. Given here are the spatial distributions of (a) temperature, (b) number density, (c) radial speed, (d) latitudinal speed, (e) radial magnetic field, and (f) latitudinal magnetic field. The horizontal and vertical axes represent the radial and longitudinal directions, respectively^[80]

然地产生百万度的日冕并在开场区形成太阳风. 考虑到太阳底层大气乃至对流层中辐射的处理已较为自治^[47], 上述目标也意味着将底层大气模型与大尺度太阳风模型耦合起来. 这一有价值的发展方向需要数值方法、辐射理论、磁流体动力学、太阳大气及太阳风物理等多领域的研究者协力合作才能达成.

4 总结

宇宙中逾99%的可见物质处于等离子体状态. 在大多数情况下, 这些物质的动力学演化可以由MHD方程组描述, 而辐射在其中扮演着举足轻重的角色, 也是我们获取天体物理过程有关信息的主要途径. 由于MHD方程组的高度非线性, 解析求解只能在大量近似等有限的情况下得到一些结果, 更准确地求解则不得不依赖于数值模拟. 因此, 辐射MHD数值模拟成为越来越重要的研究手段, 并在天体物理和空间物理中取得了辉煌的成果. 回顾这些学科过去数十年的发展历史, 可以看到, 在现阶段要取得突破性进展的方式主要依赖于大型设备的观测与大型数值模拟的开展. 事实上, 继2013年邵逸夫天文奖授予了黑洞吸积盘数值模拟专家Balbus以及

Hawley之后, 2017年该奖又授予宇宙学数值模拟专家White. 相比于大型设备的高投入, 数值模拟是性价比非常高的研究手段, 也是非常适合我们这样一个发展中的新兴国家着力发展的方向^[33].

本文综述了作者所熟悉的黑洞吸积盘、太阳物理及行星际空间物理所涉及的辐射MHD数值模拟方面的研究进展, 而辐射MHD数值模拟所涉及的领域远比这些内容要广泛得多, 譬如行星与恒星形成、超新星爆发、星系形成与演化、宇宙学等等. 限于我们的知识范围, 在此不作过多拓展, 只是希望本文能起到抛砖引玉之作用, 促进我国辐射MHD数值模拟的兴起.

在引言中提到的“天体辐射磁流体动力学学科发展战略研究项目”调研期间, 项目组成员也讨论过现阶段我国辐射MHD数值模拟的发展方式: 是利用国外的开源程序还是独立发展数值模拟程序? 我们的看法是: 数值模拟只是一种研究手段, 而不是研究目的. 在研究过程中最重要的是物理想法. 就像我们没有必要发明一套新的描述方式替代牛顿定律一样, 我们完全可以先采用国际上的开源程序进行研究工作, 并在使用的过程中根据科学问题研究的需要逐步发展我们自己的程序.

参考文献

- 1 Liu S M. Acceleration of charged energetic particles in the universe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 119509 [刘四明. 宇宙中高能带电粒子的加速. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 119509]
- 2 Low B C. Field topologies in ideal and near-ideal magnetohydrodynamics and vortex dynamics. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 015201
- 3 Wang J X, Zhang Y Z, He H, et al. Cluster of solar active regions and onset of coronal mass ejections. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 599601
- 4 Choudhuri A R. Starspots, stellar cycles and stellar flares: Lessons from solar dynamo models. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2017, 60: 019601
- 5 Balbus S A, Hawley J F. Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion disks. *Rev Modern Phys*, 1998, 70: 1–53
- 6 Wang J X, Yuan F, Chen P F, et al. Numerical experiments of radiation magnetohydrodynamics—In lieu of a preface (in Chinese). *Prog Astron*, 2016, 34: 365–369 [汪景琇, 袁峰, 陈鹏飞, 等. 辐射磁流体动力学数值实验研究(代前言). *天文学进展*, 2016, 34: 365–369]
- 7 Stone J M, Pringle J E, Begelman M C. Hydrodynamical non-radiative accretion flows in two dimensions. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 310: 1002–1016
- 8 Igumenshchev I V, Abramowicz M A, Narayan R. Numerical simulations of convective accretion flows in three dimensions. *Astrophys J Lett*, 2000, 537: L27–L30
- 9 Igumenshchev I V, Abramowicz M A. Two-dimensional models of hydrodynamical accretion flows into black holes. *Astrophys J Suppl*, 2000, 130: 463–484
- 10 Yuan F, Narayan R. Hot accretion flows around black holes. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 529–588
- 11 Balbus S A, Hawley J F. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I—Linear analysis. *Astrophys J*, 1991, 376: 214–233
- 12 Hawley J F, Gammie C F, Balbus S A. Local three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of accretion disks. *Astrophys J*, 1995, 440: 742–763
- 13 Stone J M, Hawley J F, Gammie C F, et al. Three-dimensional magnetohydrodynamical simulations of vertically stratified accretion

- disks. *Astrophys J*, 1996, 463: 656–673
- 14 Hawley J F. Global magnetohydrodynamical simulations of accretion tori. *Astrophys J*, 2000, 528: 462–479
 - 15 Machida M, Hayashi M R, Matsumoto R. Global simulations of differentially rotating magnetized disks: Formation of low- β filaments and structured coroneae. *Astrophys J Lett*, 2000, 532: L67–L70
 - 16 Stone J M, Pringle J E. Magnetohydrodynamical non-radiative accretion flows in two dimensions. *Mon Not R Astron Soc*, 2001, 322: 461–472
 - 17 Hawley J F, Krolik J H. Global MHD simulation of the inner accretion disk in a pseudo-newtonian potential. *Astrophys J*, 2001, 548: 348–367
 - 18 Ohsuga K, Mori M, Nakamoto T, et al. Supercritical accretion flows around black holes: Two-dimensional, radiation pressure-dominated disks with photon trapping. *Astrophys J*, 2005, 628: 368–381
 - 19 Koide S, Meier D L, Shibata K, et al. General relativistic simulations of early jet formation in a rapidly rotating black hole magnetosphere. *Astrophys J*, 2000, 536: 668–674
 - 20 Gammie C F, McKinney J C, Tóth G. HARM: A numerical scheme for general relativistic magnetohydrodynamics. *Astrophys J*, 2003, 589: 444–457
 - 21 Stone J M, Gardiner T A, Teuben P, et al. Athena: A new code for astrophysical MHD. *Astrophys J Suppl*, 2008, 178: 137–177
 - 22 Jiang Y F, Stone J M, Davis S W. An algorithm for radiation magnetohydrodynamics based on solving the time-dependent transfer equation. *Astrophys J Suppl*, 2014, 213: 7
 - 23 Sadowski A, Narayan R, Tchekhovskoy A, et al. Semi-implicit scheme for treating radiation under M1 closure in general relativistic conservative fluid dynamics codes. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 3533–3550
 - 24 McKinney J C, Tchekhovskoy A, Sadowski A, et al. Three-dimensional general relativistic radiation magnetohydrodynamical simulation of super-Eddington accretion using a new code HARMRAD with M1 closure. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 441: 3177–3208
 - 25 Blandford R D, Begelman M C. On the fate of gas accreting at a low rate on to a black hole. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 303: L1–L5
 - 26 Narayan R, Igumenshchev I V, Abramowicz M A. Self-similar accretion flows with convection. *Astrophys J*, 2000, 539: 798–808
 - 27 Yuan F, Bu D, Wu M. Numerical simulation of hot accretion flows. II. Nature, origin, and properties of outflows and their possible observational applications. *Astrophys J*, 2012, 761: 130
 - 28 Wang Q D, Nowak M A, Markoff S B, et al. Dissecting X-ray-emitting gas around the center of our galaxy. *Science*, 2013, 341: 981–983
 - 29 Yuan F, Gan Z M, Narayan R, et al. Numerical simulation of hot accretion flows. III. Revisiting Wind properties using the trajectory approach. *Astrophys J*, 2015, 804: 101
 - 30 Sadowski A, Narayan R, McKinney J C, et al. Numerical simulations of super-critical black hole accretion flows in general relativity. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 439: 503–520
 - 31 Kawashima T, Ohsuga K, Mineshige S, et al. Comptonized photon spectra of supercritical black hole accretion flows with application to ultraluminous X-ray sources. *Astrophys J*, 2012, 752: 18
 - 32 Shen C, Raymond J C, Murphy N A, et al. A Lagrangian scheme for time-dependent ionization in simulations of astrophysical plasmas. *Astron Comp*, 2015, 12: 1–10
 - 33 Chen P F, Ding M D, Fang C. Numerical studies of the radiative MHD processes in the lower solar atmosphere (in Chinese). *Prog Astron*, 2016, 34: 403–414 [陈鹏飞, 丁明德, 方成. 太阳低层大气辐射磁流体力学数值研究. *天文学进展*, 2016, 34: 403–414]
 - 34 Fleck B, Schmitz F. The 3-min oscillations of the solar chromosphere—A basic physical effect? *Astron Astrophys*, 1991, 250: 235–244
 - 35 De Pontieu B, Erdélyi R, James S P. Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows. *Nature*, 2004, 430: 536–539
 - 36 Chen P F, Priest E R. Transition-region explosive events: Reconnection modulated by p-mode waves. *Sol Phys*, 2006, 238: 313–327
 - 37 Roberts B. Wave propagation in intense flux tubes. *Sol Phys*, 1983, 87: 77–93
 - 38 Khomenko E, Centeno R, Collados M, et al. Channeling 5 minute photospheric oscillations into the solar outer atmosphere through small-scale vertical magnetic flux tubes. *Astrophys J Lett*, 2008, 676: L85
 - 39 Liang G Y, Li F, Wang F L, et al. A simulation package—SASAL for X-ray and EUV spectroscopy of astrophysical and laboratory plasmas. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 1351–1366
 - 40 Del Zanna G, Dere K P, Young P R, et al. CHIANTI—An atomic database for emission lines. Version 8. *Astron Astrophys*, 2015, 582: A56
 - 41 Chen P F, Shibata K, Brooks D H, et al. A reexamination of the evidence for reconnection inflow. *Astrophys J Lett*, 2004, 602: L61–L64
 - 42 Chen P F, Fang C, Chandra R, et al. Can a fast-mode EUV wave generate a stationary front? *Sol Phys*, 2016, 291: 3195–3206
 - 43 Xia C, Chen P F, Keppens R, et al. Formation of solar filaments by steady and nonsteady chromospheric heating. *Astrophys J*, 2011, 737: 27
 - 44 Zhou Y H, Chen P F, Zhang Q M, et al. Dependence of the length of solar filament threads on the magnetic configuration. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 581–588

- 45 Schwartz P, Schmieder B, Heinzel P, et al. Study of an extended EUV filament using SoHO/SUMER observations of the hydrogen Lyman lines. II. Lyman α line observed during a multi-wavelength campaign. *Sol Phys*, 2012, 281: 707–728
- 46 Vögler A, Shelyag S, Schüssler M, et al. Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code. *Astron Astrophys*, 2005, 429: 335–351
- 47 Gudiksen B V, Carlsson M, Hansteen V H, et al. The stellar atmosphere simulation code Bifrost. Code description and validation. *Astron Astrophys*, 2011, 531: A154
- 48 Keppens R, Meliani Z, van Marle A J, et al. Parallel, grid-adaptive approaches for relativistic hydro and magnetohydrodynamics. *J Comput Phys*, 2012, 231: 718–744
- 49 Fryxell B, Olson K, Ricker P, et al. FLASH: An adaptive mesh hydrodynamics code for modeling astrophysical thermonuclear flashes. *Astrophys J Suppl*, 2000, 131: 273–334
- 50 Ziegler U. The NIRVANA code: Parallel computational MHD with adaptive mesh refinement. *Compu Phys Commun*, 2008, 179: 227–244
- 51 Stone J M, Norman M L. ZEUS-2D: A radiation magnetohydrodynamics code for astrophysical flows in two space dimensions. I The hydrodynamic algorithms and tests. *Astrophys J Suppl*, 1992, 80: 753–790
- 52 Brandenburg A, Dobler W. Hydromagnetic turbulence in computer simulations. *Comp Phys Comm*, 2002, 147: 471–475
- 53 Carlsson M, Stein R F. Does a nonmagnetic solar chromosphere exist? *Astrophys J*, 1995, 440: L29–L32
- 54 Leenaarts J, Carlsson M, Rouppe van der Voort L. The formation of the H α line in the solar chromosphere. *Astrophys J*, 2012, 749: 136
- 55 Carlsson M, Leenaarts J. Approximations for radiative cooling and heating in the solar chromosphere. *Astron Astrophys*, 2012, 539: A39
- 56 Leenaarts J, Wedemeyer-Böhm S. Non-equilibrium hydrogen ionization in 2D simulations of the solar atmosphere. *Astron Astrophys*, 2007, 473: 625–632
- 57 Leenaarts J, Carlsson M, Rouppe van der Voort L. On fibrils and field lines: The nature of H α fibrils in the solar chromosphere. *Astrophys J*, 2015, 802: 136
- 58 Golding T P, Leenaarts J, Carlsson M. Non-equilibrium helium ionization in an MHD simulation of the solar atmosphere. *Astrophys J*, 2016, 817: 125
- 59 Wedemeyer-Böhm S, Ludwig H G, Steffen M, et al. Inter-network regions of the sun at millimetre wavelengths. *Astron Astrophys*, 2007, 471: 977–991
- 60 Chen P F, Fang C, Ding M D. Ellerman bombs, type II white-light flares and magnetic reconnection in the solar lower atmosphere. *Res Astron Astrophys*, 2001, 1: 176–184
- 61 Ni L, Zhang Y, Zheng H, et al. Heating mechanisms in the low solar atmosphere through magnetic reconnection in current sheets. *Astrophys J*, 2016, 832: 195
- 62 McIntosh S W, de Pontieu B, Carlsson M, et al. Alfvénic waves with sufficient energy to power the quiet solar corona and fast solar wind. *Nature*, 2011, 475: 477–480
- 63 van Ballegooijen A A, Asgari-Targhi M, Cranmer S R, et al. Heating of the solar chromosphere and corona by Alfvén wave turbulence. *Astrophys J*, 2011, 736: 3
- 64 van der Holst B, Sokolov I, Meng X, et al. Alfvén wave solar model (AWSOM): Coronal heating. *Astrophys J*, 2014, 782: 81
- 65 Bourdin P A, Bingert S, Peter H. Observationally driven 3D magnetohydrodynamics model of the solar corona above an active region. *Astron Astrophys*, 2013, 555: A123
- 66 Peter H, Bingert S. Constant cross section of loops in the solar corona. *Astron Astrophys*, 2012, 548: A1
- 67 Chen F, Peter H, Bingert S, et al. Magnetic jam in the corona of the sun. *Nat Phys*, 2015, 11: 492–495
- 68 Bourdin P A, Bingert S, Peter H. Scaling laws of coronal loops compared to a 3D MHD model of an active region. *Astron Astrophys*, 2016, 589: A86
- 69 Zou P, Fang C, Chen P F, et al. Magnetic separatrix as the source region of the plasma supply for an active-region filament. *Astrophys J*, 2017, 836: 122
- 70 Karpen J T, Antiochos S K. Condensation formation by impulsive heating in prominences. *Astrophys J*, 2008, 676: 658–671
- 71 Xia C, Chen P F, Keppens R. Simulations of prominence formation in the magnetized solar corona by chromospheric heating. *Astrophys J Lett*, 2012, 748: L26
- 72 Xia C, Keppens R, Antolin P, et al. Simulating the *in situ* condensation process of solar prominences. *Astrophys J Lett*, 2014, 792: L38
- 73 Chen P F. Prominence formation and oscillations. *ASInC*, 2013, 10: 1–10
- 74 Štěpán J, Trujillo B J, Leenaarts J, et al. Three-dimensional radiative transfer simulations of the scattering polarization of the hydrogen Ly α line in a magnetohydrodynamic model of the chromosphere-corona transition region. *Astrophys J*, 2015, 803: 65
- 75 Gurnett D A, Kurth W S, Burlaga L F, et al. *In Situ* observations of interstellar plasma with voyager 1. *Science*, 2013, 341: 1489–1492
- 76 Zank G P. Faltering steps into the galaxy: The boundary regions of the heliosphere. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2015, 53: 449–500

- 77 Xiong M, Li B. Numerical simulation of strong coupling between magneto-fluid and energetic particles in the outer heliosphere (in Chinese). *Prog Astron*, 2016, 34: 425–449 [熊明, 李波. 外日球层太阳风“磁流体-能量粒子”强耦合系统的数值模拟. *天文学进展*, 2016, 34: 425–449]
- 78 Abbo L, Ofman L, Antiochos S K, et al. Slow solar wind: Observations and modeling. *Space Sci Rev*, 2016, 201: 55–108
- 79 Cranmer S R. Coronal holes. *Living Rev Sol Phys*, 2009, 6: 3
- 80 Matsumoto T, Suzuki T K. Connecting the Sun and the solar wind: The self-consistent transition of heating mechanisms. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 440: 971–986
- 81 Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. Solar wind origin in coronal funnels. *Science*, 2005, 308: 519–523
- 82 Lionello R, Linker J A, Mikic Z. Multispectral emission of the sun during the first whole sun month: Magnetohydrodynamic simulations. *Astrophys J*, 2009, 690: 902–912
- 83 Feng X, Ma X, Xiang C. Data-driven modeling of the solar wind from 1 Rs to 1 AU. *J Geophys Res Space Phys*, 2015, 120: 10159–10174
- 84 Labrosse N, Li X, Li B. On the Lyman α and β lines in solar coronal streamers. *Astron Astrophys*, 2006, 455: 719–723
- 85 Meng X, van der Holst B, Toth G, et al. Alfvén wave solar model (AWSOM): Proton temperature anisotropy and solar wind acceleration. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 454: 3697–3709

Summary for “天体物理和空间物理中辐射磁流体动力学数值模拟研究现状与展望”

Research progress and future prospect of radiative magnetohydrodynamics numerical simulations in astrophysics and space physics

Feng Yuan^{1*}, Pengfei Chen² & Bo Li³

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

³ Institute of Space Science, Shandong University, Weihai 264209, China

* Corresponding author, E-mail: fyuan@shao.ac.cn

Over 99% of the baryonic matter in the universe is in the state of plasmas, where matter interacts strongly with the magnetic field. Radiation is generally involved in such interactions, hence affecting the dynamics of the plasmas. All these interactions are described by radiation magnetohydrodynamics (MHD) equations. Because of the strong non-linearity and the multi-scale coupling, only a very limited number of analytical solutions to the MHD equations have been obtained with various approximations and simplifications. To fully understand the physical processes involved in the violent astrophysical eruptions, we have to resort to numerical simulations, which are becoming more and more important in solving the equations and helping us understand the mechanisms hidden in the universe. Owing to the development of the computation hard wares and numerical algorithms, numerical simulations, together with theoretical analyses and experiments (or observations), become three major methods in nowadays research. In particular, numerical simulations have made tremendous progress in the past decades. This paper reviews the research progress of radiation MHD numerical simulations made in astrophysics (including solar physics) and space science during the past 10 years. Their future prospect is also envisioned.

Limited by space, only the following topics are included in this review paper.

(1) Radiation MHD numerical simulation has become more and more important in various aspects of astrophysical research. In this review, we take black hole accretion as an example. This is mainly because radiation MHD simulation is best developed and applied in this field. In fact, almost all the important progresses in the past 20 years in this field were achieved by radiation MHD numerical simulations. In this review, we introduce three examples. One is the magneto-rotational instability, which is widely believed to be the mechanism of angular momentum transport in accretion flows. The second one is the wind launched from black hole accretion flows, including why we believe the existence of strong winds and what the mechanisms of wind production are. The third topic is the super-Eddington accretion. We introduce how radiation MHD numerical simulations have completely changed our traditional paradigm that was reached by analytical studies.

(2) In respect of solar physics, after briefly mentioning the necessity of radiation MHD numerical simulations in the solar atmosphere research, we introduce four different approaches in dealing with the radiation process based on different parameter regimes of various atmospheric layers, such as the photosphere, chromosphere, transition region, and the corona. We further describe the numerical results related to several crucial topics in solar physics, including the formation of several key spectral lines, the structure of the lower solar atmosphere, magnetic reconnection in the lower solar atmosphere, chromospheric and coronal heating, formation of coronal loops, filament formation, and so on.

(3) As an illustrative example of typical applications of RMHD in space physics, we offer an overview as to how RMHD is incorporated into the numerical simulations of the solar wind in the inner heliosphere. For this purpose, we first offer a brief introduction to the consensus on the origins of the solar wind, thereby showing that the acceleration of the nascent solar wind is very likely to be a direct result of coronal heating in magnetically open regions. We go on to show that radiation needs to be carefully addressed to self-consistently account for the wind thermodynamics. With some illustrative examples we show how radiation is handled in current multi-dimensional solar wind models.

radiation magnetohydrodynamics (RMHD), numerical simulations, astrophysics, solar physics, space physics

doi: 10.1360/N972017-00861