

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.04.12

黑洞吸积数值模拟研究的近期进展

部德福, 袁 峰

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 当前, 数值模拟已经成为国际上天体物理研究中最重要研究手段之一。具体针对黑洞吸积领域, 调研了数值模拟在该领域的研究情况。首先简单回顾了近 20 年来黑洞吸积领域数值模拟的发展过程, 然后以热吸积流中的风以及超爱丁顿吸积为例, 强调说明了数值模拟技术这一新的研究手段为该理论的发展起到的关键性作用。这两个方面是近年来黑洞吸积领域最重要的研究进展。随后指出了两个可望通过数值模拟技术取得重要进展的研究课题, 并针对这两个问题, 结合我国的实际情况, 提出了如何发展黑洞吸积数值模拟的建议。

关键词: 黑洞吸积; 数值模拟; 辐射磁流体

中图分类号: P142.6 **文献标识码:** A

1 黑洞吸积领域数值模拟的历史及现状

如汪景琇等人^[1]所述, 数值模拟已经成为了研究天文学的重要手段。数值模拟已经在天体物理、太阳、空间物理研究领域发挥了重要作用。本文将针对数值模拟在黑洞吸积领域的发展及现状展开讨论。

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、流体的(无磁场)、无辐射的。吸积盘的角动量转移通过在流体程序中加入人工粘滞得以实现^[2-6]。此时的吸积盘模拟主要关注低吸积率的辐射无效的热吸积流^[7-9]。原因主要有两点: (1) 很多情况下辐射对动力学影响不大, 因此模拟时可以忽略复杂的辐射转移计算; (2) 热吸积流的几何很厚, 盘的厚度与半径相当, 这样, 热吸积流的数值模拟对分辨率的要求不高, 可以用分辨率较低的数值模拟来研究热吸积流。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。

吸积盘模型从 1973 年建立以来, 吸积盘中气体的角动量转移一直是一个难题。20 世纪

收稿日期: 2016-08-30; 修回日期: 2016-10-12

资助项目: 上海市自然科学基金(16ZR1442200); 国家自然科学基金(11573051, 11633006, 11661161012); 国家重点研发计划(2016YFA0400700); 科学院先导项目(XDB09000000)

通讯作者: 部德福, dfbu@shao.ac.cn

90 年代, Balbus 和 Hawley^[10-12] 发现磁旋转不稳定可以在吸积盘中引起磁流体湍动, 磁流体湍动可以转移气体的角动量。他们两人由于此研究而获得了 2013 年的邵逸夫天文奖。随着这一发现, 人们开始在吸积盘的数值模拟中加入磁场, 无辐射、三维磁流体的数值模拟程序开始被开发出来, 并大量应用到黑洞吸积盘的模拟中^[13-16]。最初研究磁旋转不稳定性的数值模拟都采用三维的局地剪切盒。随着计算机硬件的发展, 在 2000 年左右, 三维、无辐射、全局的磁流体数值模拟开始出现。这些模拟的出现大大推动了对低吸积率、辐射无效热吸积流的动力学的研究^[17-22]。

2000 年以前的黑洞吸积盘数值模拟基本上都忽略了辐射转移。对于低吸积率的热吸积流来说, 忽略辐射转移, 对吸积盘的动力学影响不大。但是, 对于标准薄盘^[23]和超爱丁顿吸积的吸积盘(即细盘^[24])来说, 辐射非常重要, 光子的辐射转移过程不可忽略。因此, 为了研究标准薄盘和细盘, 2000 年后, 带辐射转移的磁流体力学程序开始出现^[25]。当时, 带辐射转移的数值模拟程序是两维的、磁流体的、牛顿力学框架下的; 光子场是频率积分的, 且在处理辐射转移时采取了 FLD 近似 (flux-limited diffusion, 流量限制扩散近似^[25-27])。

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 教授小组开发的 ATHENA 程序。这个程序是三维的、磁流体的、非相对论的、解频率积分的光子辐射转移的程序^[28-30]。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目前国际上最先进、最精确的。第二个是由哈佛大学小组基于 HARM^[31]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^[32-35])。普林斯顿大学 Stone 教授小组目前正在其程序中加入广义相对论, 已接近尾声。

2 近年来黑洞吸积领域的重要科学进展

同其他天体物理研究方向一样, 在数值模拟技术出现以前, 黑洞吸积领域以前的研究手段主要是解析方法结合简单的数值计算。绝大部分的解析研究都是一维的、不含时的, 包含的物理过程也相对比较简单。这种方法当然有其优点, 就是物理图像清晰, 对于很多问题也能够抓住主要的物理图像, 尤其在理论的发展早期往往能起到巨大的推动作用。但另一方面, 由于解析方法的限制, 解析研究不可避免地会忽略掉一些可能很重要的物理过程, 有时会导致理论的重大偏差。采用数值模拟这一研究手段就可以避免这些局限性。实际上, 黑洞吸积理论近年来的主要进展几乎都是通过数值模拟实现的。在这一部分, 我们着重介绍黑洞吸积理论近年来两个最主要的进展: (1) 热吸积流中风的问题, (2) 超爱丁顿吸积。

2.1 热吸积流的风

吸积流在被黑洞吸积、落入黑洞的同时还会产生风。风的产生在本质上是二维问题, 无法通过一维研究进行。关于热吸积流以及热吸积流中风的产生问题, 更全面的科学方面的

综述可参看文献 [9]。

近年来, 吸积流中风的问题是该领域中最重要研究课题, 也是黑洞吸积领域近年来最主要的研究进展之一。这一问题之所以重要, 有以下几个原因。首先, 研究发现吸积盘外边界处绝大部分的吸积气体最终都没有落入黑洞, 而通过风的形式损失掉, 即风的质量流比落入黑洞视界的质量流要大得多。如此强的风对于吸积盘的动力学, 如角动量的转移、质量吸积率、温度和密度分布等, 都有重要影响, 这进而会影响吸积盘的辐射, 以及我们对于观测结果的理解。另外, 目前的研究表明, 星系中心的活动星系核对于星系的形成和演化可能起着非常重要的作用, 这即是活动星系核反馈。反馈的媒介为: (1) 活动星系核的辐射; (2) 活动星系核的外流, 包括风和喷流。

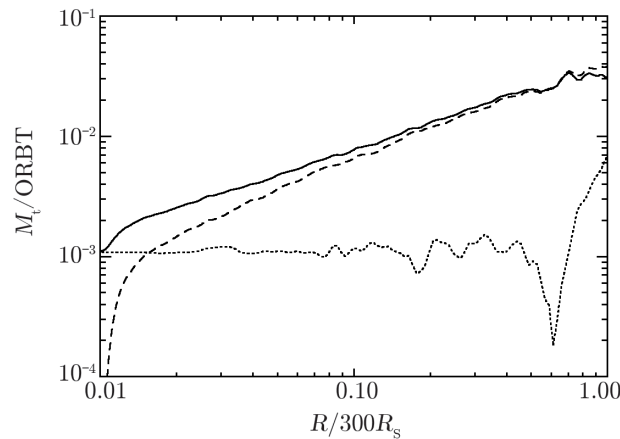
热吸积盘中风产生的研究可追溯到 1999 年。Stone 等人在该年发表了第一篇黑洞吸积的整体数值模拟的论文^[2]。在该文中, 作者计算了吸积流的质量内流率、外流率和净吸积率。这几个量的定义如下:

$$\dot{M}_{\text{in}}(r) = -2\pi r^2 \int_0^\pi \rho \min(v_r, 0) \sin \theta d\theta, \quad (1)$$

$$\dot{M}_{\text{out}}(r) = 2\pi r^2 \int_0^\pi \rho \max(v_r, 0) \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

$$\dot{M}_{\text{net}} = \dot{M}_{\text{in}} - \dot{M}_{\text{out}}. \quad (3)$$

在上面的吸积率表达公式中, 我们采用了球坐标系 (r, θ, ϕ) 。在 Stone 等人的文章^[2]中, 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做半径的幂律函数 (如图 1 所示)。这是很令人吃惊的结果, 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是半径的常数。



注: 实线、虚线和点线分别代表内流率、外流率和净吸积率。R 以 300 Schwarzschild 半径 ($300R_s$) 为单位。

图 1 质量内流率、外流率和净吸积率的径向分布^[2]

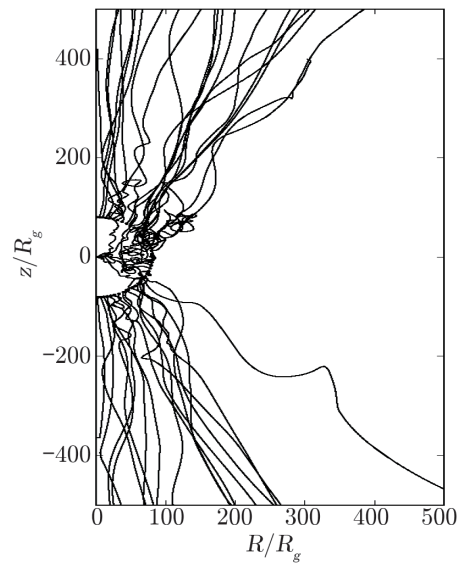
为解释这一数值模拟结果, 国际上两个著名的研究组提出了两个竞争性的模型。这两个模型分别为斯坦福大学的 Blandford 与他的合作者提出的 ADIOS 模型 (adiabatic inflow-outflow solution^[36-38]), 以及哈佛大学的 Narayan 与他的合作者们提出的 CDAF 模型 (convection-dominated accretion flow^[39,40])。在 ADIOS 模型中, 作者假设由于风的存在, 使得吸积气体逐渐损失, 导致吸积率随着半径减小而减小。注意, 风的存在只是个假设, 至于风是怎样产生的, ADIOS 模型没有给出解释。CDAF 模型的建立是基于热吸积流是对流不稳定的假设。在 CDAF 模型中, 对流向内转移角动量的效率和粘滞向外转移角动量的效率相同, 互相抵消。因此, 在黑洞附近会形成一个对流元包。对流元包中, 气体始终在向内和向外做对流运动, 气体逐渐被锁在对流元包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? 袁峰等人^[41]运用磁流体力学数值模拟方法, 对这一问题进行了研究。问题的关键在于, 数值模拟中, 真正的外流 (风) 到底有多少比例。在公式 (2) 中, 只要速度 v_r 大于零, 我们就将这部分气体看做外流。在吸积流中, 真正的外流和对流元包中向外运动的成分同时存在, 因此, 公式 (2) 计算的外流率既包含真正的外流也包含对流成分。袁峰等人^[41]计算和比较了外流和内流的各种物理性质, 如温度、径向速度、转动速度、熵等。他们发现, 外流和内流的性质差别巨大。如果公式 (1) 和 (2) 给出的内外流率是对流元包对流运动所主导, 我们可以预期, 内流和外流的性质差别不大。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, 袁峰等人^[41]得出结论, 公式 (2) 给出的外流率中, 真正的外流, 即风, 应该是主导的。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。

袁峰等人^[41]的研究并没有给出定量的风的质量流等详细的物理性质, 而这些性质对于我们研究一些问题 (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^[42]提出了虚拟粒子轨迹线方法, 用这一方法能够将湍流与真正外流区分开。这一方法的要点如下。数值模拟给出了不同时刻, 空间各个点的密度和速度分布。我们选择一些点, 根据这些点的速度和时间序列数据的时间步长, 可以得到这些点上的气体在下一个时刻的位置。通过一步步时间的计算, 我们可以得到气体的运动轨迹, 从而可以清楚地看出气体是做湍动还是做真正的外流运动。Yuan 等人^[42]发现, 公式 (2) 给出的外流率中, 风的比例约为 60%。因此, 热吸积流中风是存在的, 风的存在导致了吸积率随着吸积的进行逐渐降低。他们还分析了风被驱动的机制, 发现风是被气体压强梯度力、磁压梯度力和离心力共同驱动的。图 2 展示了一些外流的轨迹线, 从这个图中我们可以明显看到很强的外流。

2.2 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全面的物理, 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



注：坐标 $(0,0)$ 点为黑洞所在位置。图中的不同线条表示不同气体元的运动轨迹。从这张图可以看到，在黑洞吸积流中存在强的风。

图 2 气体运动轨迹线图^[42]

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，最著名的工作是 Abramowicz 等人^[24]提出了超爱丁顿吸积的细盘 (slim) 模型。该模型是一维解析的工作，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，如同时代所有解析的黑洞吸积工作一样，该工作没有考虑外流。该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，导致光子通过扩散沿着盘的竖直方向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。对于一定的吸积率，可以定量估算出一个半径，在此半径以内光子很难逃逸，而是被囚禁在吸积流中进入黑洞。这就导致这种吸积流的辐射效率比标准薄盘大大降低。从这一角度讲，这种模型类似光学薄的“ADAF” (advection-dominated accretion flow, 径移主导的吸积流^[9])。这种模型因此也被称为光学厚的 ADAF。在此模型框架下，后人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而增长^[43]。

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以及美国普林斯顿大学、哈佛大学的几个小组的工作^[25,44-46]。这些工作中，Jiang 等人^[44]严格求解辐射转移方程，因此他们对于辐射转

移的处理最精确。他们计算了一个吸积率为 $200 L_{\text{Edd}}/c^2$ 的例子, 考虑的黑洞自旋为零, 得到的吸积流的结构见图 3。与以前的解析模型对比, 他们发现存在一些很大的不同。一是发现存在很强的外流, 吸积率不再是半径的常数。更重要的是, 对于如此高的吸积率, 他们发现, 吸积流的辐射效率为 4.5%。这一数值几乎与标准薄盘的效率相同, 远高于一维解析细盘模型的预言。产生这一差异的物理原因是, 他们发现除了细盘模型中考虑到的光子扩散之外, 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 (advection)。这一新的传输机制是由于吸积流中存在磁浮力导致的, 这一能量传输机制比光子扩散更加有效。这导致了光子囚禁效应不再占主导地位, 因此辐射效率大大提高。

与 Jiang 等人^[44]的结果相比, 哈佛小组的工作^[45,46]存在两个主要不同。一是他们的程序是建立在广义相对论基础上的, 这方面比起 Jiang 等人^[44]的计算有其一定的优势。不过在辐射转移的处理上, 他们用的是一种称为“M1 闭合算法”的近似处理方法。与 Jiang 等人^[44]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^[44]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^[44]的工作相比, 他们得到的结论有相似的地方, 也有不同。相似之处是, 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, 光子囚禁效应与 Jiang 等人^[44]的研究结果相比更重要。另一个重要不同是, Jiang 等人^[44]发现辐射近似是各向同性的, 而 Sadowski 和 Narayan^[46]发现辐射是强烈各向异性的。靠近吸积盘转轴, 辐射流量远高于爱丁顿流量, 而在其他方向, 辐射则会低得多。例如, 对于自旋为零的黑洞, 吸积率为 $10\dot{M}_{\text{Edd}} \equiv 10L_{\text{Edd}}/c^2$ 时, 模拟发现半径 $250R_g$ 处, 靠近转轴处辐射流量 (不是光度) 为 $F \approx 19F_{\text{Edd}}$; 而在 $\theta = 30^\circ$ 的地方, $F \approx 4F_{\text{Edd}}$ 。另外, Sadowski 和 Narayan^[45]还发现, 模型参数如黑洞自旋也对结果有很大影响。黑洞自旋较大时, 辐射光度会有几倍的提高。例如, 黑洞自旋 $a = 0.7$ 时, 即使对于 $\dot{M} = 17\dot{M}_{\text{Edd}}$, 得到的光度下限就已经超过了 $8L_{\text{Edd}}$ 。总之, 目前上述两个课题组工作差异的原因还在研究之中, 但是目前的两项工作都表明, 以前的一维解析细盘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。

3 本领域面临的重大科学问题

作为高能天体物理中的一个基础理论, 随着数值模拟技术的发展, 黑洞吸积理论近年来取得了重大进展。但是, 与其他很多天体物理理论一样, 仍然存在不少没有解决的重要科学问题。Yuan 和 Narayan 综述论文^[9]的最后一部分对这些未解决的重要科学问题进行了总结。在本文中, 我们侧重于数值模拟方面, 介绍两个可以通过数值模拟的发展解决而且与观测数据结合较为紧密的重要问题: (1) 离子和电子的加热; (2) 吸积盘中辐射谱的计算。

3.1 吸积盘中电子和离子的加热

黑洞吸积盘中的气体温度一般处于 $10^5 \sim 10^{12}$ K 之间, 气体为高电离度的等离子体。由于直接求解等离子体方程的难度很大, 因此, 目前的黑洞吸积盘数值模拟程序都采取了磁流

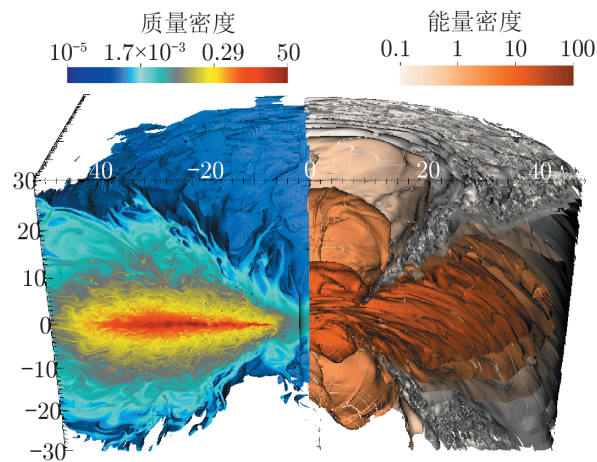


图 3 三维辐射磁流体数值模拟得到的黑洞的超爱丁顿吸积流的质量密度 (左半部) 以及能量密度 (右半部) 的结构^[44]。

体 MHD (magnetohydrodynamics) 近似。这大大简化了方程, 节约了计算时间。但是一些重要的科学问题没有办法被研究, 比如吸积盘中电子和离子的加热问题。目前的 MHD 程序中, 假设吸积盘为理想磁流体, 所以, 磁场的演化方程中没有显性的耗散项。因此, 在 MHD 程序中, 没有显式的气体加热项。在数值模拟程序中, 程序网格尺度的数值磁重联损失掉的磁场能一般被直接加入到气体内能中。此种做法虽然保持了总能量守恒, 但是气体被加热的过程考虑非常粗糙。另外, 目前的 MHD 程序大部分都是单温的 (假设电子和离子温度相同), 因此, 更无法研究吸积盘中的电子和离子加热问题。

精确地考虑吸积盘中电子和离子的加热过程对于解决某些问题至关重要, 例如对于吸积盘出射光谱的计算。吸积盘的光谱来自于盘中电子的辐射, 因此, 为了解释吸积盘的光谱, 首先要清楚吸积盘中电子的温度。吸积盘中, 影响电子温度的过程包括电子的加热过程、电子和离子通过库仑碰撞交换能量的过程以及电子的辐射过程。一般认为, 黑洞吸积盘中, 离子和电子是被磁重联过程^[47-51]和磁流体湍动加热的^[52-54]。而磁重联和磁流体湍动对电子和离子的加热过程都是微观物理过程, 需要用动理论 (kinetic theory) 来进行研究。综上所述, 为了研究吸积盘中电子和离子的加热问题, 我们需要开发一套程序, 该程序需要放弃 MHD 近似, 而直接求解等离子体方程; 或者更现实的做法是, 在 MHD 方程中加入利用动理论研究得出的一些结果, 如应用 particle in cell (PIC, 网格粒子方法) 方法研究得出的一些结果, 即作为所谓的“subgrid”物理, 加入到 MHD 程序中。

3.2 吸积盘出射谱的计算

目前的数值模拟虽然大大加深了我们对黑洞吸积盘动力学的理解, 但无法给出吸积盘的出射光谱。无法计算出射谱的原因有三个: (1) 黑洞吸积盘中离子和电子的加热不清楚; (2) 目前大部分的数值模拟都是单温的 (假设离子和电子温度相同), 然而, 很多情况下, 离子和电子的温度不同; (3) 目前的数值模拟在求解光子辐射转移时对光子的频率进行了积分。

对于第一个问题, 3.1 节已经介绍。对于第二个问题, 我们在开发 MHD 程序时, 可以分别求解电子和离子的能量方程。离子能量方程包括, 湍流和磁重联对离子的加热项, 离子和电子库仑碰撞造成的能量损失项, 离子能量的径移项。电子的能量方程包括, 湍流和磁重联对电子的加热项, 电子和离子库仑碰撞过程中电子的能量获得项, 电子能量的径移项。对于第三个问题, 在新开发的辐射磁流体 (Radiation magnetohydrodynamics, RMHD) 程序中, 我们要求解不同频率下的光子场的辐射转移过程。这可能是这几个问题中最复杂的, 原因在于, 此时辐射场既是时间和空间的函数, 还是频率的函数, 因此, 该部分需要的计算量将会是巨大的。

目前对于出射谱的计算, 国际上有学者采用蒙特卡罗方法^[55]。他们首先用 MHD 数值模拟计算吸积盘的动力学, 得到吸积盘的物理量分布 (例如密度和温度随着半径的变化), 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, 计算吸积盘の出射谱。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, 比如对于超爱丁顿吸积即是如此。另外, 蒙特卡罗数值模拟内在的扰动使得其在对尤其是辐射压主导的吸积盘进行模拟时, 结果非常不精确^[56-59]。基于以上原因, 非常有必要开发 RMHD 程序直接求解光子的辐射转移方程。

4 国内的研究现状以及我们的发展策略

和国外黑洞吸积盘研究的蓬勃发展相比, 国内从事黑洞吸积盘数值模拟的研究人员很少, 主要集中在中国科学院上海天文台。国内也没有自主开发的 RMHD 程序, 因此国内的研究人员一般使用国际上通用的数值模拟程序 (如, ZEUS^①, PLUTO^②, ATHENA^③等)。使用这些程序当然能够研究很多重要的科学问题, 但是对于我们上文提到的一些问题, 则无能为力。因此, 无论是从解决上面提到的重要科学问题而言, 还是对于培养国内在数值模拟方面的人才队伍出发, 长远看, 我们都非常有必要开发自己的 RMHD 程序。

对于吸积盘中电子和离子加热这个科学问题, 我们需要开发像 PIC 类型的数值模拟。这方面需要与国内的等离子体或者空间物理的同行合作进行, 他们有的人已有这方面的经验。关键问题可能是做好 PIC 模拟与 MHD 模拟之间的“接口”, 使得 PIC 模拟的结果能够正确地应用到 MHD 数值模拟中来。

对于计算吸积盘出射谱的 RMHD 程序的开发, 第一步是需要开发一个三维 MHD 程序作为平台, 然后在 MHD 基础上开发辐射转移模块。目前国际上 MHD 的算法已经比较成熟, 现在比较流行的是采用有限体积的方法 (例如, ATHENA, CANS 等程序)。我们可以制定一

^①<http://www.astro.princeton.edu/~jstone/zeus.html>

^②<http://plutocode.ph.unito.it/>

^③<https://trac.princeton.edu/Athena/>

个大家共用的标准, 来开发自己的三维 MHD 平台; 或者, 我们可以直接将已经公开的 MHD 程序作为我们的平台。如果开发自己的 MHD 平台, 我们需要注意满足磁场散度为零的条件。目前, 比较常用的保持磁场散度为零的方法是用 CT (Constrained transport^[60]) 方法求解磁感应方程。使用这种方法后, 只要初始放入的磁场散度为零, CT 方法可以一直保持磁场散度为零。ZEUS 和 ATHENA 程序就是利用这种方法来保证磁场散度为零。辐射转移模块的开发难度相对较大, 解决其最好的方法是首先要熟练掌握国际上已有的辐射磁流体程序, 尤其是一些处理得很好的程序, 如 ATHENA。这包括使用该程序研究一些科学问题, 并对该程序的内部结构有相当程度的了解和掌握。然后, 在此程序基础上开发非频率积分的光子辐射转移程序。

参考文献:

- [1] 汪景琇, 袁峰, 陈鹏飞, 等. 天文学进展, 2016, 34: 365
- [2] Stone J M, Pringle J E, Begelman M C. MNRAS, 1999, 310: 1002
- [3] Igumenshchev I V, Chen X, Abramowicz M A. MNRAS, 1996, 278: 236
- [4] Igumenshchev I V, Abramowicz M A. MNRAS, 1999, 303: 309
- [5] Igumenshchev I V, Abramowicz M A. ApJS, 2000, 130: 463
- [6] McKinney J C, Gammie C F. ApJ, 2002, 573: 728
- [7] Narayan R, Yi I. ApJ, 1994, 428: L13
- [8] Narayan R, Yi I. ApJ, 1995, 444: 231
- [9] Yuan F, Narayan R. ARA&A, 2014, 52: 529
- [10] Balbus S A, Hawley J F. ApJ, 1991, 376: 214
- [11] Balbus S A, Hawley J F. ApJ, 1992, 400: 610
- [12] Balbus S A, Hawley J F. RvMP, 1998, 70: 1
- [13] Hawley J F, Gammie C F, Balbus S A. ApJ, 1995, 440: 742
- [14] Hawley J F, Gammie C F, Balbus S A. ApJ, 1996, 464: 690
- [15] Stone J M, Hawley J F, Gammie C F, Balbus S A. ApJ, 1996, 463: 656
- [16] Stone J M, Pringle J E. MNRAS, 2001, 322: 461
- [17] Hawley J F, Balbus S A, Stone J M. ApJ, 2001, 554: L49
- [18] Hawley J F, Krolik J H. ApJ, 2001, 548: 348
- [19] Machida M, Hayashi M R, Matsumoto R. ApJ, 2000, 532: L67
- [20] Machida M, Matsumoto R, Mineshige S. PASJ, 2001, 53: L1
- [21] Machida M, Nakamura K, Matsumoto R. PASJ, 2004, 56: 671
- [22] Machida M, Nakamura K, Matsumoto R. PASJ, 2006, 58: 193
- [23] Shakura N I, Sunyaev R A. A&A, 1973, 24: 337
- [24] Abramowicz M A, Czerny B, Lasota J P, Szuszkiewicz E. ApJ, 1988, 332: 646
- [25] Ohsuga K, Mineshige S, Mori M, Umumera M. ApJ, 2002, 574: 315
- [26] Hayes J C, Norman M L, Fiedler R A, Bordner J O, Li P S. ApJ, 2006, 165: 188
- [27] Ohsuga K, Mineshige S. ApJ, 2011, 736: 2
- [28] Stone J M, Gardiner T A, Teuben P, Hawley J F, Simon J B. ApJS, 2008, 178: 137
- [29] Jiang Y F, Stone J M, Davis S W. ApJS, 2014a, 213: 7
- [30] White C J, Stone J M, Gammie C F. ApJS, 2016, 225: 22
- [31] Gammie C F, McKinney J C, Toth G. ApJ, 2003, 589: 444
- [32] Skinner M A, Ostriker E C. ApJS, 2013, 206: 21
- [33] Sadowski A, Narayan R, Tchekhovskoy A, Zhu Y. MNRAS, 2013, 429: 3533

- [34] McKinney J C, Tchekhovskoy A, Blandford R D. *Sci*, 2013, 339: 49
- [35] McKinney J C, Tchekhovskoy A, Sadowski A, Narayan R. *MNRAS*, 2014, 441: 3177
- [36] Blandford R D, Begelman M C. *MNRAS*, 1999, 303: L1
- [37] Blandford R D, Begelman M C. *MNRAS*, 2004, 349: 66
- [38] Begelman M C. *MNRAS*, 2012, 420: 2912
- [39] Narayan R, Igumenshchev I V, Abramowicz M A. *ApJ*, 2000, 539: 798
- [40] Quataert E, Gruzinov A. *ApJ*, 2000, 539: 809
- [41] Yuan F, Bu D F, Wu M C. *ApJ*, 2012, 761: 130
- [42] Yuan F, Gan Z M, Narayan R, Sadowski A, Bu D F, Bai X N. *ApJ*, 2015, 804: 101
- [43] Watarai K, Fukue J, Takeuchi M, Mineshige S. *PASJ*, 2000, 52: 133
- [44] Jiang Y F, Stone J M, Davis S W. *ApJ*, 2014, 796: 106
- [45] Sadowski A, Narayan R, McKinney J C, Tchekhovskoy A. *MNRAS*, 2014, 439: 503
- [46] Sadowski A, Narayan R. *MNRAS*, 2016, 456: 3929
- [47] Bisnovatyi-Kogan G, Lovelace R. *ApJL*, 1997, 486: L43
- [48] Quataert E, Gruzinov A. *ApJ*, 1999, 520: 248
- [49] Ding J, Yuan F, Liang E. *ApJ*, 2010, 708: 1545
- [50] Hoshino M. *PhRvL*, 2012, 108: 5003
- [51] Hoshino M. *ApJ*, 2013, 773: 118
- [52] Quataert E. *ApJ*, 1998, 500: 978
- [53] Blackman E G. *MNRAS*, 1999, 302: 723
- [54] Medvedev M V. *ApJ*, 2000, 541: 811
- [55] Whitney B A. *BASI*, 2011, 39: 101
- [56] Davis S W, Stone J M, Jiang Y F. *ApJS*, 2012, 199: 9
- [57] Yusef-Zadeh F, Morris M, White R L. *ApJ*, 1984, 278: 186
- [58] Densmore J D, Urbatsch T J, Evans T M, Buksas M W. *JCoPh*, 2007, 222: 485
- [59] Steinacker J, Baes M, Gordon K D. *ARA&A*, 2013, 51: 63
- [60] Stone J M, Norman M L. *ApJS*, 1992b, 80: 791

Numerical Simulations in the Field of Black Hole Accretion

BU De-fu, YUAN Feng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Numerical simulation is one of the important tools for the study of astrophysics. In recent years, great development in the field of black hole accretion has been achieved. In this paper, we introduce the progress in the numerical simulations of black hole accretion disk. We first report the history and current situations of numerical simulations in the field of black hole accretion. Taking two examples, we further demonstrate the importance of numerical simulations in accelerating the knowledge of black hole accretion theory. We also introduce the important scientific problems which need to be solved in the future. Finally, we propose the method on how to develop numerical simulation code.

Key words: black hole accretion; numerical simulations, radiation magnetohydrodynamics