

# 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 63 次

学部工作局学术与文化处 编报  
《中国科学》杂志社

2017 年 6 月 13 日

---

## “辐射磁流体力学三维数值实验研究”论坛综述

### 一、国内外研究现状

等离子体在宇宙中广泛存在。整个宇宙中超过 99% 的重子物质是由等离子体组成的。此外，有些研究地面过程的重要学科也是以等离子体为研究对象的，一个例子就是受控核聚变。等离子体一般都伴随磁场，辐射也往往很重要，磁场及辐射的存在会影响甚至决定着等离子体的动力学以及辐射行为。在一般情况下，将等离子体当作磁流体进行处理是个很好的近似。辐射磁流体力学(RMHD)研究与辐射相互作用的磁流体的动力学行为，用以描述天体等离子体在宏观尺度上的电磁相互作用、结构、辐射以及动力学。一方面磁流体可以通过吸收或产生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。反过来，辐射以及磁场往往是由流体控制的，所以辐射、磁场、等离子体是耦合在一起的，这种相互作用决定了各种情况下的物理过程。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，对于这些物理过程的理解程度直接决定了人们在上述学

科中的研究进展。

以天体物理学为例，近年在该学科的许多方面，**RMHD** 提供了观测解释、物理分析和数值建模的理论基础。天体物理学中很多例证显示 **RMHD** 的重要性。例如，温度为千万度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；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辐射相联系；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主要的角动量转移机制；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，被认为是宇宙种子磁场增强和产生各向异性的机理。这些在宇宙中无处不在的局部物理过程又决定了宏观的空间尺度及宇宙学时标上的整体演化。比如，黑洞吸积导致的活动星系核的辐射和外流是宇宙学框架下星系形成与演化中的重要物理过程。在宇宙科学中，**RMHD** 涉及的主要是局地演化中的复杂性和非线性。

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、观测研究或（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释及对观测实验的最佳拟合。与其他学科不同，由于宇宙中非常极端的物理条件，如强磁场、极端真空、强引力等，人们很难在地球上的实验室对天体过程进行有直接可比性的实验研究。在这个意义上，天文学和天体物理学研究领域中的数值实验研究显得尤为重要。在数值模拟出现之前，天文学研究的手段包括观测与理论研究。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，并从观测数据中获得对于宇宙物理本质的理解，不让观测退化成数据的杂陈与编目。即便如此，这两种研究方式以前依然相对独立。而数值模拟的出现，便架起了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，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，往往是取得系统性原创成果的最有希望又最经济的手段。

## 二、论坛概况

2017年2月27~28日，中国科学院学部第63次科学与技术前沿论坛——“辐射磁流体力学三维数值实验研究”在中国科学院学术会堂召开。中国科学院院士、中国科学院国家天文台研究员汪景 担任大会执行主席。中国科学院数学学部常委会副主任崔向群院士致开幕词，并全程参加了论坛的学术报告和讨论。中国科学院方成院士、胡文瑞院士、江松院士、汪景 院士，中国科学院国家天文台副台长薛随建研究员主持了5个阶段的报告，中国科学院上海天文台天体物理研究室主任袁峰研究员主持了论坛最后的大会讨论。来自中国科学院上海天文台、国家天文台、国家空间科学中心、北京应用物理与计算数学研究所、美国哈佛大学、美国加州大学圣芭芭拉分校、比利时鲁汶大学、南京大学、山东大学、中国科学技术大学等相关领域的11位专家学者做了特邀综述报告，来自33个院校和研究机构的百余位国内外专家学者和研究生参与了论坛的学术交流和讨论。

本次论坛是中国科学院一个战略规划项目的总结和延续。2014年11月，中国科学院数学学部审议通过了汪景 院士负责的“天体辐射磁流体力学”学科发展战略研究项目。该项目组织国内外专家对这一快

速发展中的学科分支的国际发展态势、学科进展和我们可能的努力做系统的调研、评估和分析。这些总结和报告分别关注 RMHD 在天体物理、日地物理、聚变等离子体物理中的应用，并评述了相关的数值方法，作为一组评述论文发表在《天文学进展》杂志 2016 年第 4 期。

### 三、论坛的目的、意义和重点关注问题

数值 RMHD 近年来得到快速发展，在天体物理、空间物理和受控等离子体物理等研究中得到越来越重要的应用。为引起国内学术界对这一前沿领域的关注，展示相关研究进展，吸引更多的前沿学者参与，我们特意组织了本次论坛。

针对 RMHD 三维数值模拟在上述领域中的重要应用和关键科学问题，我们精选了 11 个特邀学术报告。报告主要关注了天体物理、太阳物理、宇宙线和空间物理、磁约束等离子体物理中 RMHD 数值实验研究，总结了该领域各研究方向近年来取得的重要研究成果，并对未来发展趋势做了展望。

### 四、报告内容

#### (一) 袁峰（中国科学院上海天文台）：黑洞吸积与外流的数值模拟研究

观测表明，几乎每个星系中心都存在一个超大质量黑洞。每个星系中都还存在几千万个恒星质量黑洞。因此，黑洞吸积是天体物理中的基本物理过程之一。在气体往黑洞下落的过程中，引力能会转化成气体内能，其中一部分内能会通过辐射释放出来。黑洞吸积理论描述的就是黑洞周围气体在黑洞引力作用下的动力学以及辐射过程，它是活动星系核、黑洞双星、伽马射线暴等研究方向的基础理论。本报告着重介绍了黑洞吸积理论近年来的一个主要研究成果，即关于风的问题。传统上，大家认为，黑洞吸积过程没有物质损失，所有进入黑洞势力范围的气体最终都会被黑洞吸积进去。然而，黑洞吸积的国际首

次数值模拟发现一个奇怪结果，即吸积率是半径的函数。针对这一结果，国际上以两位美国科学院院士为首提出了“风”以及“对流”两个假说。这两个学派争论了十几年没有结果，包括该领域的邵逸夫天文奖获得者也都卷入其中。为解决这一争论，我们进行了详细的磁流体动力学数值模拟，结合对流、湍流的理论分析，证明外流应该很强，而且吸积流应该是对流稳定的。这就证明对流观点是错误的，吸积率的降低是由于风的结果。也就是说，黑洞吸积伴随着大量的物质外流。实际上，从吸积盘边界算起，大约 99% 的气体最终都通过风损失了。这一研究完全改变了人们一直以来对黑洞吸积的认识。另外，研究发现，靠近黑洞转轴，风的速度非常大，而且张角也比较小。这提出了一个新问题，即这很有可能对应着我们观测上的喷流。因此，下一步应该研究喷流到底是由于提取黑洞转动能还是吸积盘转动能导致的。我们关于风的理论研究被第二年发表在 *Science* 上的、基于 Chandra 天文望远镜对银河系中心超大质量黑洞吸积流的观测完全证实。最后，报告中还介绍我们将风的理论应用到解释银河系中心的费米气泡的观测。这一观测是费米天文望远镜最主要的发现，获得了罗西 X 射线天文奖。相比其他理论模型，我们的模型优点是自由参数少，而且与观测到的气泡边缘的温度、速度、谱线等结果一致。这一研究对于活动星系核反馈的研究有重要意义。

## （二）陈鹏飞（南京大学）：磁流体力学数值模拟在太阳物理研究中的应用

任何一门自然学科的早期研究方式都是观测（或实验）。随着数学的发展，出现了相应的理论及数学模型。但是，以非线性方程组为表达形式的数学模型极其复杂，制约了理论的深入发展。随着计算机的普及，非线性方程组的数值求解成为可能，这大大促进了理论模型的发展，以至于数值模拟成为第三种研究手段，它兼有理论研究及实验研究的特点和长处。在过去的 30 年里，每年在太阳物理领域发表的数

值模拟文章数目几乎以线性的趋势增长。

本报告以三个工作为例，分别说明数值模拟在研究中所起的三种作用。

通过数值模拟证实很好的物理想法。美国同行在研究日冕物质抛射的前兆特征时，发现它经常伴随新的磁场从太阳表面浮现出来，而且浮现磁场的极性正好和已有的磁场极性相反。我们对此设想了一个物理图像，即新浮磁场与已有磁场发生磁重联，重联后的磁力线获得一个向上的洛伦兹力，该力触发日冕物质的抛射。通过 MHD 数值模拟，证实了该物理图像，从而提出了日冕物质抛射的新浮磁流触发机制，完美地解释了观测特征。

通过数值模拟改进不成熟的物理想法。我们在一项关于日冕快模波的观测研究中发现一个非常奇怪的特征：快模波在遇到磁分界面时产生一个驻留的波前。我们起初的想法是：快模波通过一个弱磁场区时，部分波被俘获，在弱磁场区左右边界之间来回反射，从而形成驻留波前。可是，通过数值模拟我们却没有看到快模波的回反射，反而发现入射的快模波在磁分界面附近出现了波模转换，由部分快波转换为慢波。由于慢波不能穿越磁力线，从而导致驻留波前。

通过数值模拟发现物理本质。日冕极紫外波在 1998 年被发现以来，引起了广泛的争议。十几年前人们普遍认为它是日冕中的快模磁声波，但该模型无法解释极紫外波的一些观测特征。我们对此进行了数值模拟，在模拟中再现了极紫外波。通过对数值模拟结果的分析，我们大胆地提出一种全新的物理机制，即磁力线拉伸模型。该模型的预言在 10 年后得到观测的证实。

### **(三) 姜燕飞 (美国加州大学圣芭芭拉分校): 黑洞吸积盘的三维辐射磁流体数值模拟**

气体通常以盘的形式被黑洞吸积。这个过程中，引力势能转化为热能从而形成观测到的吸积盘。当气体吸积的速度足够快，辐射压可

以大大超过气体压并对吸积盘的性质起决定性的作用。当气体吸积到超大质量黑洞时 ( $\sim 10^5 \sim 10^{10}$  太阳质量), 这种情况下的吸积盘会形成我们观测到的活动星系核。当黑洞质量只有几个太阳质量时, 这种吸积盘会形成 X 射线双星。当经典吸积盘理论用于描述这些辐射压占主导的吸积盘时, 这个盘的模型有很多没有解决的问题。比如辐射压占主导的薄盘模型是热不稳定的, 这个盘模型理论在这种情况下本身是不自洽的。

三维 RMHD 数值模拟能够让我们从基本 RMHD 方程出发, 直接计算不同吸积率下, 不同质量黑洞周围吸积盘的性质。这些三维数值模拟能够直接计算由于磁转动不稳定性导致的湍流所产生的角动量转移, 并且自洽地计算在这个角动量转移和吸积的过程中, 引力势能是如何转化为热能, 然后由辐射场将热能由吸积盘的内部转移到表面。这些数值模拟可以直接将吸积盘转化为可以观测到的辐射场, 从而可以与观测结果直接进行比较。

最近几年, 通过三维 RMHD 数值模拟, 我们发现薄盘的热不稳定性是真实存在的。数值模拟将能够探索热不稳定性最终会怎样影响盘的结构。当吸积率超过爱丁顿吸积率的时候, 吸积盘会变厚。通过三维全局盘的数值模拟, 我们能够直接研究吸积盘在这种情况下结构和性质, 以及吸积盘在不同质量黑洞和吸积率下的区别。特别地, 我们通过这些数值模拟实验发现吸积盘中一些全新的能量传递过程, 由辐射压所导致的外流、吸积盘中的密度波等一系列新的物理现象。这些都是经典盘的模型所不能考虑到的。这些数值模拟的新发现有助于解释一系列活动星系核和 X 射线双星中的观测现象。这些数值模拟实验也提供了一个研究强辐射条件下的磁流体性质的最好的平台。

#### (四) 白雪宁 (美国哈佛大学): 行星形成数值模拟的研究现状与展望

近二十年以来, 天文学家对系外行星的探测取得了长足的进展,

然而关于行星形成的理论研究在基础层面上始终存在很多未解疑团。行星在气态的原行星盘中形成，而行星形成的几乎全过程都与原行星盘中气体与尘埃的动力学密不可分。

磁场在原行星盘的气体动力学中扮演着至关重要的角色：目前的研究表明它几乎完全由磁场的作用主导 [见 Bai & Stone, 2013, *ApJ*, 769, 76; 亦见 Turner et al., 2014, *Protostars and Planets VI*, 411 的综述文章]。盘中磁场与气体的耦合程度取决于气体的电离度，而其极低的电离度会引入三种非理想磁流体效应。直到最近，全部三种非理想磁流体效应才被引入 MHD 代码中通过局部数值模拟研究行星盘的气体动力学 [见 Bai, 2014, *ApJ*, 791, 137; Bai, 2015, *ApJ*, 798, 84; Lesur et al., 2014, *A&A*, 566, 56]，并展现出丰富的动力学性质。这些研究的主要结论包括：1) 盘的角动量转移和长期演化由磁盘风而非磁转动不稳定性主导；2) 由于霍尔效应，盘的动力学同外界磁场的极性有关。在这一方向，未来需要进行全局的磁流体数值模拟。这方面的工作目前正在开展。

原行星盘中的热力学与化学过程同样对气体动力学有重要影响。磁盘风的质量损失对盘表面的热力学十分敏感 [见 Bai et al., 2016, *ApJ*, 818, 152]，而盘的电离度，以及盘表面气体的冷却又取决于诸多化学过程。同时，气体的热力学和化学直接决定了盘的观测特征，并直接关乎新形成行星的组成成分。因此，引入辐射转移以及能够准确计算化学演化对自洽地模拟原行星盘的气体动力学也十分必要。目前，原行星盘带辐射转移的数值模拟较少，且关于辐射的处理非常简化 [如 Flock et al., 2013, *A&A*, 560, A43]，而含时化学演化的数值模拟几乎未有开展 [唯一的例外如 Turner et al., 2007, *ApJ*, 659, 729]。

尘埃在 PPD 中扮演多重角色。一方面，它们通过碰撞粘合而最终成为行星形成的基本组分，另一方面，尘埃通过其不透明度影响盘的辐射转移及热力学，同时尘埃也是很多化学作用的载体。研究尘埃在

盘中的输运、星子形成以及尘埃向星星胚胎的吸积等行星形成的基本问题需要在磁流体数值模拟中加入粒子。目前 **Pencil code** [Johansen et al., 2007]和 **Athena code** [Bai & Stone, 2010, ApJS, 190, 297] 具备尘埃粒子功能，并包含尘埃对气体的反馈作用。未来需要尘埃粒子的应用推广到全局模拟中。

总之，行星形成同原行星盘中气体与尘埃的动力学密切相关，其中的物理过程又涉及非理想磁流体、化学、热辐射、非热辐射、空气阻力等诸多效应的作用以及它们之间的相互耦合。目前的 **RMHD** 代码只能部分满足这些需求，未来需要在代码中引入新的物理过程以更有效自洽地开展行星形成的研究。

#### **(五) 郭福来 (中国科学院上海天文台): 宇宙线辐射磁流体数值模拟及其在天体物理中的应用**

(磁)流体数值模拟是研究宇宙中各类天体演化与物理过程的有效方法，模拟的对象是符合麦克斯韦分布的重子气体。近百年前被首次探测到的宇宙线是不符合麦克斯韦分布的高能带电粒子，包括高能质子、电子与其他原子核。近年来，宇宙线在一些关键天体物理过程中的重要作用逐渐受到重视，研究这些过程需要开发同时包含普通重子气体与宇宙线的磁流体数值程序，这已成为当今计算天体物理领域的一个热点前沿方向。国际上天体物理领域的几个主流模拟程序 (如 **ZEUS, ENZO, Gadget, AREPO, FLASH, GIZMO** 等)在近几年都开始发展宇宙线模块，包含的相关物理过程包括宇宙线压强、宇宙线传输 (**diffusion, advection, streaming**)、宇宙线激发磁流体波、宇宙线与热气体的非弹性强子碰撞过程等。在大质量星系与星系团的演化中起到重要作用的活动星系核反馈是由超大质量黑洞的喷流引起的，尤其是密度非常低、内低声速的喷流。这些喷流很可能是由宇宙线能量主导的。如果这些宇宙线能离开喷流产生的气泡，并进入到星系团介质，其激发的阿尔文波将在星系团介质中耗散并有效加热它，这有可能是

解决星系团冷却流问题的关键机制。含有热气体与宇宙线的双流体数值模拟也已经被用来研究 2010 年新发现的银河系费米气泡,发现费米气泡很可能是银河系中心黑洞的活动产生。星系风在低质量星系的演化中起到关键作用,然而一系列超新星的爆发如何驱动星系风却一直是该领域的主要谜团之一。近几年的一个研究热点正是超新星爆发加速的宇宙线在驱动星系风方面的重要作用。数值模拟研究表明,在宇宙线传输与宇宙线压强的双重作用下,宇宙线能有效驱动星系尺度的星系风,尤其是与观测比较符合的含多种温度成分的星系风。宇宙线的观测特征主要是非热辐射,包括同步辐射、逆康普顿散射、 $\pi$  介子衰变产生伽马射线等。这些辐射过程将直接影响宇宙线能谱演化,而宇宙线扩散也与宇宙线粒子的能量相关。因此,当前把宇宙线近似为一种流体的模拟方法是不太准确的,这个领域下一步的重要新方向是把宇宙线能谱演化自然地包含到磁流体数值模拟中。

#### (六) 夏蕊(比利时鲁汶大学): 日珥和冕雨的辐射磁流体数值模拟研究

日珥和冕雨是日冕中十分常见的活动现象,它们看似形态不同,却有着相同的形成机制和相似的等离子体状态。它们都是由百万度日冕等离子体经历辐射热不稳定性引发的冷却凝聚过程而形成的一万度左右的高密度冷等离子体。日珥相对稳定地存在于水平磁场主导的大尺度螺旋磁通量绳中,而冕雨出现在竖直磁场主导的磁环腿部,如雨滴般沿着磁力线快速下落。日珥形态多样,内部结构和等离子体状态十分复杂,是研究部分电离磁化等离子体的天然实验室。日珥最终会向上爆发,形成日冕物质抛射,传播到地球附近造成灾害性的空间天气。研究日珥有助于理解日冕物质抛射的起源,为空间天气预报的物理模型奠定基础,具有现实意义和应用价值。冕雨的研究有助于理解日冕环中热动力学过程和为日冕加热的理论研究提供限制条件和检验手段。

因为日珥和冕雨现象十分复杂，包含很多非线性的物理过程，纯理论研究十分困难，所以我们通过 **RMHD** 数值模拟，构建了日珥和冕雨的三维数值模型，深入理解了等离子体从色球蒸发到日冕冷凝的形成机制和动力学过程。在日珥模型中，首先通过底边界速度驱动的方式模仿了日冕中大尺度螺旋磁绳的形成过程，然后在磁绳的两个色球足点区域加入随高度快速衰减的加热。我们发现，加热把色球物质“蒸发”到日冕，在磁绳中聚集，使得局地辐射增强，快速带走能量并发生热不稳定过程，导致局地快速降温 and 物质汇聚，形成低温高密向日珥等离子体。日珥物质形成始于许多的不断运动的小团块。它们持续形成并聚集于磁绳下部的重力势井中，同时拖拽着磁场缓慢落下，最终落回到色球层。这一过程持续发生并最终达到动态平衡，呈现出一个大尺度稳定的日珥，与实际观测的结果非常相似。在冕雨模型中，我们模仿一对太阳黑子产生的日冕偶极磁场，在磁环的两个色球足点区域同时集中加热，热不稳定性在磁环顶部发生，导致磁环冷却凝聚形成冕雨等离子体团。形成后的冕雨物质沿着磁环滑落回色球层，冕雨周围复杂的热动力学环境，使得冕雨在下落过程中被拉长并产生密度的不均匀。日珥和冕雨的模拟都揭示了物质由于“蒸发”和“冷凝”在色球层和日冕层之间往复循环的过程。

### **（七）冯学尚（中国科学院国家空间科学中心）：太阳风暴的数值模拟研究**

太阳风暴吹袭地球时，常常引起近地空间环境的恶化，给人类的航天、通信、导航等领域带来巨大损失。数值预报可为减轻和防止太阳风暴造成的损失提供科学依据，其研究具有重要的科学意义和应用价值。科学上，有助于理解太阳风暴在行星际空间传播的动力学过程；应用上，基于强大计算能力的三维行星际太阳风暴过程的数值模拟研究，可以更精准地预测太阳风暴的强度、到达时间和对地球空间环境的影响程度。目前，基于 **MHD** 的数值模拟研究已经完成了从初始定

性研究向具体事件和数值预报定量研究的转变。空间天气科学理解所能达到的水平和深度由各类先进地基和空基等探测设施的探测能力、信息采集与处理能力所决定。太阳风暴数值预报研究旨在发展基于物理的日地因果链模式耦合系统，研究日地系统乃至日球层中不同尺度的物理现象的形成、传输、转化和相应能量耗散的基本过程和规律，并预报突发性空间环境变化及其对人类高技术活动的影响。

报告介绍了我们近期在太阳风暴的初发以及日冕-行星际日地空间传播过程研究中所取得的一系列研究进展。基于太阳行星际的多卫星观测约束，融入当前对物理过程的认识，如太阳风加速加热等新成果，自主发展了太阳风暴传播研究的三维 MHD 数值模型——太阳行星际守恒元解元模型，包括连续观测数据驱动的太阳风时变背景模型、连续观测数据驱动的爆发活动 MHD 演化模型、连续观测数据驱动的爆发活动日地空间传播模型以及空间天气要素可视化研究。借助天基和地基的太阳与行星际观测输入，模型能够用于探索太阳风暴（如日冕物质抛射，CME）源区的性质与状态，呈现太阳风暴的日冕与行星际过程，预测近地空间太阳风状态时间变化的主要特征结构。首次实现了以太阳观测为约束获得接近真实的 CME 三维磁流体演化特征，给出太阳风的连续数天或数月的中长期演化，重现与观测基本一致的日地空间传播演化的过程，向日冕-行星际天气过程数值预报迈出坚实的一步，从而为近地空间天气过程研究提供科学输入打下基础。

此外，讨论了未来空间天气数值预报研究所面临的观测、物理与数值技术方面需要解决的重要问题，并提出可能的解决方案。

#### （八）李波（山东大学）：日冕与太阳风的多元磁流体数值模拟

太阳风是来自太阳的高速带电粒子流，主要成分为质子、电子和  $\alpha$  粒子。在地球轨道处，太阳风按质子流速  $v_p$  可分为高速流( $v_p$  约 800 km/s)及低速流( $v_p$  约 300~400 km/s)。太阳风的起源问题是太阳和空间物理中的重要课题，它又包含两个相互联系的层面：太阳风起源

于何处？新生太阳风如何由约 10 km/s 加速至数百 km/s？报告简述了太阳风的主要观测特征及其起源问题的现有认识，说明太阳风加速很可能是开场区日冕加热的后果。特别地，无论高速流还是低速流，在近日区都具有如下特征：不同组分的流速不同，温度也不同且离子温度高于电子温度并很可能具有显著的各向异性。这意味着，尽管源区可能不同，但新生高速流与低速流可能具有类似的加速机制。而为探究这一机制，有必要对各组分的能动量输运进行区别处理。就刻画多组分太阳风大尺度特征而言，一个计算上可行的方案来自对玻尔兹曼方程求矩并以合理的方式加以截断，最终形成所谓多元磁流体描述。除刻画太阳风物质、动量及能量输运外，它还以源项的形式纳入太阳风加热的微观物理，从而通过对比模型输出与观测来协助判断各类主流加热加速机制的可行性。报告详述了这一描述的典型数值实现，特别关注辐射项的处理，并利用典型算例报告了该描述三类应用。就宏观物理而言，该描述可重现重离子发射线中宁静冕流形态与白光冕流形态的差异，并给出基于“交换-引力沉淀”两步机制的物理解释；可给出多元太阳风中角动量损失的理论描述，进而表明太阳自转这一简单而自然的机制可以解释 2 AU 开外质子与  $\alpha$  粒子间流速差的实地观测。就微观物理而言，该描述可重现太阳风质子温度各向异性由日面直至地球轨道的空间分布，且可利用太阳风的近地性质与日冕磁场曲率的相关性不同来协助判断湍动 Alfvén 波的平行串级及垂直串级两种主流加热机制的合理性。此外，由多元磁流体模型的计算结果合成紫外谱线轮廓，对该轮廓利用标准光谱学诊断手段获得近日区物理参数，而后比较诊断值与数值计算所得“真值”，该描述还可用来评估现有光谱学手段的不确定性。

#### （九）王建国、吴勇（北京应用物理与计算数学研究所）：等离子体中的物理过程

20 世纪 80 年代以来，随着激光等离子体物理的快速发展和高能

量密度物理研究的兴起，人们意识到等离子体环境效应对原子分子过程的影响可能是重要的，并开展过一些理论研究工作。但受到计算能力的限制，主要采用微扰或变分进行计算。我们在开展原子参数研制过程中，发现等离子体环境对原子分子过程的影响是不可忽略的。这是由于等离子体中存在复杂多体关联作用，集体表现为屏蔽库伦作用或耦合效应，改变了等离子体环境中原子的结构和动力学过程，并可能导致新的物理现象出现。

因此，我们从最简单的等离子体出发，采用德拜模型描述等离子体的多体相互作用，发展非微扰方法和计算程序，系统研究等离子体屏蔽效应对微观原子结构和动力学过程的定量影响。报告概述了近 10 年来课题组在等离子体环境中原子过程研究方面的进展，包括等离子体环境中的原子结构、原子光激发和光电离、电子碰撞激发和电离，以及离子-原子碰撞过程中的激发、电离和电荷转移过程等。同时也报告了该领域研究中存在的主要问题，以及未来的研究方向。

在等离子体中原子结构研究中，我们发现谱线发生红移且谱线强度发生显著改变，这是由于等离子体屏蔽效应影响，导致原子能级升高、束缚态数目减少所造成的。在等离子体环境对光电离过程影响研究中，我们发现势形共振、虚态共振和 Cooper 极小点，这些现象在孤立单电子原子体系研究中没有发现过；在等离子体环境对电子碰撞过程影响研究中，我们发现等离子体屏蔽效应极大地改变了电子碰撞过程的阈值行为，且发现了 Feshbach 共振向势形共振过渡的现象；在等离子体环境对重粒子碰撞过程影响研究中，首次采用非微扰方法研究等离子体中重粒子碰撞电荷转移、激发和电离过程，并建议一种诊断等离子体状态的方法。通过我们的研究，获得了等离子体环境对原子结构和动力学过程影响的定量认识，发现了一系列等离子体屏蔽作用引起的新的物理现象和规律，从而具备了定量评估高温高密等离子体屏蔽效应对武器和 ICF 物性参数影响的能力，推动了原子物理与等离

子体物理学科交叉的一个新的研究方向。

然而，强耦合等离子体中的原子过程更为复杂，德拜模型势将不再适用，需要发展更可靠的理论模型和计算方法。目前，我们正发展分子动力学方法，研究强耦合超冷等离子体的耦合性质和动力学演化。通过构造强耦合超冷等离子体的多体相互作用势，配合实验室中强耦合超冷等离子体中原子能级移动的精确测量，定量研究等离子体强耦合效应对原子结构和动力学的影响。

#### **(十) 高亮（中国科学院国家天文台）：宇宙学数值模拟**

计算星系宇宙学是星系宇宙学研究领域一个非常重要和活跃的分支。本学科的主要研究手段是结合理论模型和天文观测，通过在超级计算机上实现大规模数值模拟，进而取得对宇宙中的天体形成和演化的基本规律的认识。本学科的主要优点是可以通过在巨型计算机上重现多尺度、高度非线性、高度复杂的物理过程，从而可以研究一些纯解析工作无法进行研究的天文和天体物理学现象。伴随着计算机的诞生，计算星系宇宙学发源于 20 世纪 60 年代，在 80、90 年代，本学科经历了一个蓬勃发展的过程，它在 20 世纪排除宇宙学热暗物质模型并建立起当今标准的冷暗物质宇宙学模型做出了不可替代的贡献。在当今的“精确宇宙学”时代，计算星系宇宙学既在理论研究方面又在指导天文观测方面发挥着巨大的作用。目前的计算星系宇宙学不仅仅局限于早期单纯的多体模拟，重子的流体力学过程也能够得到很详细的模拟了。所以，我们利用它既可以研究暗物质占主导地位的宇宙大尺度结构、宇宙暗能量、宇宙暗物质分布，还能研究重子物质物理过程非常重要的天体形成过程，比如宇宙第一缕光、宇宙中星系的形成和演化、宇宙再电离过程、超大质量黑洞形成和演化、星系间物质分布和化学成分、类星体的性质等等。可以说，计算星系宇宙学目前已经几乎延伸到星系宇宙学的各个研究领域了。在今后的 10~20 年，国际天文学领域将投入运行一些大的观测设备，这些设备主要将涉及探究宇

宙中暗物质和暗能量性质、宇宙再电离历史、高红移宇宙、星系形成与演化。进行这些大规模天文观测需要进行预研究和模拟观测，将会对计算星系宇宙学在相应领域有巨大的需求。计算宇宙学也会朝着规模更大、解析度更高、包含更为详尽和更具有真实物理过程的方向发展，同时也对超级计算机的计算能力提出新的要求和挑战。宇宙学数值模拟的核心技术在于宇宙学多尺度物理过程的高效数值实现算法。在我国已经拥有世界上最快速计算机硬件的情况下，我国在模拟软件开发方面还相对薄弱。可喜的是我们正在发展基于国内超级计算架构下自主的模拟软件并初步取得了突破。

#### **(十一) 蔡辉山（中国科学技术大学）：磁约束等离子体的若干辐射磁流体力学问题**

能源的可持续是人类社会面临的一个迫切的问题。聚变能是一种资源无限、清洁的资源，是人类未来能源的主导形式之一。实现和平利用核聚变能是解决未来能源问题的途径之一。磁约束核聚变是实现可控核聚变的途径之一，它是利用磁场约束带电粒子的特性来实现。目前国际在建的国际热核聚变实验堆（ITER）计划的目标是对和平利用核聚变能量的科学和技术可能性的一个展示，以及国内计划建设的中国聚变实验反应堆（CFETR）。热核聚变的功率平衡要求输入的功率和产生的功率要大于损失的功率，从而点火条件需要满足劳森判据，即高温等离子的约束时间、温度、密度需要满足一定的条件。而功率损失的途径主要是辐射引起的能量损失、粒子热传导和扩散引起的能量损失等。辐射能量损失是很重要的能量损失通道之一，主要是由等离子体的各种粒子之间的相互作用引起的，主要包括韧致辐射、杂质线辐射等。一般认为辐射的危害是当辐射功率达到一定的比例时，辐射冷却会使等离子体电流剖面收缩并引发不稳定性甚至导致等离子体破裂。但是为了减小偏滤器靶板的热负荷，又需要在等离子体边界和偏滤器区保持高的辐射损失。根据 ITER 的参数设计，为不超过在稳

态运行时第一壁材料所能承受的热负荷，要求辐射损失比例达到 75% 的水平，其中偏滤器区的辐射至少要占到总辐射的 50%。但是边界和偏滤器区的辐射损失容易引起辐射不稳定性，如 MARFE 不稳定性等，从而引起边界的冷却和电流分布收缩，并且触发低模数的磁流体不稳定性，最终导致大的破裂。因而，在磁约束聚变等离子体中，等离子体辐射是其中的一个重要问题，有必要进行研究。当等离子体辐射功率达到一定比例时，会引起不稳定性，甚至导致等离子体破裂。在磁约束等离子体中，RMHD 主要涉及到的是由辐射引起的磁流体不稳定性，及其对等离子体约束的影响。目前，仍存在一些关键性的问题，如密度极限、等离子体破裂过程中的辐射损失等。迄今，磁约束聚变等离子体中还没有完整的 RMHD 的数值模拟工作。

## 五、共识及建议

会上，针对每个报告进行了提问和讨论。与会者一致认为，RMHD 将在天体物理等领域的研究中占有越来越重要的地位。具体到研究手段，由于问题本身的复杂性和非线性，大规模的数值计算和模拟已经不可取代，成为与观测（实验）和理论相互补充的三个主要研究手段之一，将来会占有越来越重要的学术地位。有学者指出，以天体物理中的一个重要基础理论——黑洞吸积理论为例，近 20 年来几乎所有的重要进展都是通过数值模拟方法得到的。

我们应该发展自己的计算程序。具体到发展的策略，首先应该熟悉目前国际上目前的主要程序，包括从科学上用这些程序做一些研究工作，以及从技术上熟悉这些程序的算法、内部结构等。在熟悉这些现有程序的基础上，以科学问题驱动，试图发展自己的数值模拟程序。在发展过程中要注意自己的创新点。

计算资源是大家讨论比较热烈的一个问题。突出问题是大家普遍感觉计算资源比较欠缺，这是目前国内发展计算 RMHD 数值模拟的一个瓶颈问题。进行大规模的数值模拟（不只限于天文和空间物理，也

包括其他学科)需要大量的计算资源。国内计算设备的使用都是收费的,这些费用很高,如一个通常的黑洞三维数值模拟每年需要100万元。现有的基金,如基金委面上项目、重点项目、科技部的项目等,都只能用于常规科研费用,很难用于负担这笔计算费用。美国、欧洲、日本等国都有专门的基金或者资源支持数值模拟。目前国内唯一的用于支持数值模拟的基金是广东省与基金委的一个联合资助,这是远远不够的。所以,计算资源的基金资助方面,亟需扩大范围以及强度。

会议形成的重要建议如下:

计算资源方面:建议国家有关部门考虑设立计算基金。一个方案是在国家自然科学基金委员会设立专门基金,用于支持计算天体物理的研究;另一个方案是请国家有关部门出台一个政策,允许基础研究人员免费使用国家超级计算中心资源。这将促进计算天体物理以及其他领域的基础研究的快速发展,并提高国家大型计算设备的科研产出。

建议组织关于RMHD数值模拟方面的暑期学校,用于培养该方向的年轻学生以及研究人员。

本次论坛召集了国内从事与RMHD研究有关课题的各个不同研究领域的人员,共有包括从年轻学生到6位院士在内的不同年龄、层次的100余人参会,极大地增强了该研究方向在国内学术界的影响力。对于年轻学生而言,论坛中不同研究方向的学术报告开阔了他们的思路和视野。

## 六、与国外研究相比的优势和差距

由于计算机硬件的限制,该学科方向以前属于发展比较缓慢的领域。但是,随着计算机硬件的快速发展,近年来该领域在国际上发展非常迅速,在科学研究中占有越来越重要的地位,并取得了非常多的成果。以天文学为例,目前计算天体物理已经成为继理论研究、观测之外的第三个研究手段。以美国天文和天体物理研究排名最靠前的普林斯顿大学和哈佛大学为例,他们在十几年前相继分别成立了“计算科

学研究所”以及“理论与计算研究所”，分别挂靠在天体物理系以及天体物理中心，以强调计算天体物理的作用。日本这方面也规划较早，比如他们 20 年前就集中了全国有关科学家，共同花 10 年时间完成了一个较为通用的大型 MHD 计算程序（CANS）。

总体来看，我国这方面劣势明显，重视程度远远落后于国际先进国家。前期可能受制于计算机硬件，后来计算机硬件发展很快，却没有及时将这一优势应用到天文领域。处于劣势的另一个原因是，相对来说，大型的数值模拟入门比较困难，需要较长的时间积累，而我们国家这方面缺乏基础，导致了总体落后。不过，从这次会上也可以看出，我国已经在黑洞吸积、宇宙学模拟、太阳物理等研究方向初步具备了与国际水平竞争的能力和水平，个别课题的研究达到了国际领先水平。

## 七、特色和创新

本次论坛是一次真正意义上的学科交叉论坛，聚集了天体物理、日地与空间物理、受控等离子体等不同方向的科研人员，就不同学科中 RMHD 数值实验研究交换了信息，讨论了共同和有特殊性的科学问题。这样的较为广泛的学科交叉在学术会议中仍不多见，引起了青年学者较强烈的兴趣和关注。该研究方向还与国家需求和国防建设有重要关系。计算 RMHD 在武器研制和国防科技中有重要应用。

特邀报告人都是活跃在研究前沿的中青年学者，以杰出青年学者为主。在特邀报告人中，有三位在哈佛大学、加州大学和鲁汶大学从事前沿研究的我国青年科学家。参会的学者中，年轻学者和研究生占绝大多数。

（作者：汪景琇，中科院院士，中国科学院国家天文台研究员；袁峰，中国科学院上海天文台研究员；陈鹏飞，南京大学教授；李波，山东大学教授）