

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.04.09

恒星形成的辐射流体 (磁流体) 数值模拟研究进展

杨孝鸿

(重庆大学 物理系, 重庆 400044)

摘要: 恒星是宇宙中最重要的天体之一, 恒星形成是天体物理学研究的重要课题。天文学家正致力于理解与恒星形成相关的一系列问题, 如: 大质量恒星和星团是如何形成的? 什么样的物理过程决定了恒星形成区域的物理性质? 初始质量函数由什么确定? 恒星形成率由什么决定? 近年来, 恒星形成的数值模拟研究不断发展。主要介绍了辐射流体 (磁流体) 的数值研究在原恒星核坍缩、大质量恒星形成、星云破碎和坍缩、星团形成和初始质量函数等方面的模拟研究进展。

关 键 词: 恒星形成; 辐射转移; 数值模拟

中图分类号: P152 **文献标识码:** A

1 引 言

恒星是宇宙中最重要的天体之一, 衔接着行星和星系两个不同级别的天体, 不仅对行星的形成和演化有着重要的作用, 而且也影响着星系的结构和演化。恒星物理在近一个世纪的发展中日臻成熟, 但是恒星的诞生 (如大质量恒星的形成) 和死亡 (如超新星爆发) 依旧是天体物理中重要的课题, 这两个方向的研究有助于从整体上认识宇宙。本文作为“辐射磁流体力学数值实验研究”专刊的一部分^[1], 主要关注在恒星形成研究领域中所面临的主要问题, 以及数值模拟在这方面所取得的进展。

研究发现恒星的演化轨迹取决于恒星的初始质量, 其是恒星演化理论的重要成果之一, 而恒星的初始质量由什么来决定依然不清楚。这也是恒星形成理论发展中需要解决的关键问题。在观测方面: (1) Salpeter^[2] 于 1955 年首次提出了一个初始质量函数 (Initial Mass Function, IMF, $\frac{dN}{d\lg(m)} \propto m^{-\Gamma}$) 来描述恒星的相对数量与恒星质量之间的关系。初始质

收稿日期: 2016-09-01; 修回日期: 2016-11-01

资助项目: 中央高校基本科研业务 (106112016CDJXY300007); 国家自然科学基金 (11547305)

通讯作者: 杨孝鸿, yangxh@cqu.edu.cn

量函数是研究恒星初始质量的有力工具。对于几倍太阳质量以上的恒星, IMF 中的指数 $\Gamma = 1.35^{[3]}$ 。(2) 在银河系最致密的星团中 (arches cluster), 存在着大量的大质量恒星, 质量在 $10 \sim 120 M_{\odot}$ 不等, 最大质量可能不会超过 $150 M_{\odot}^{[4]}$ 。这些大质量恒星的形成仍然是一个谜。它们在元素核合成、重元素扩散以及反馈方面都发挥着重要作用。在理论研究方面, 恒星的形成问题可以分为恒星尺度和星团尺度两个层次。在恒星尺度上, 一个单星 (或双星) 是如何形成的。需要回答的有: 对于各种质量的恒星, 它们的所有质量都是来自于一个致密气体“核”的引力坍缩吗? 气体核在形成原恒星过程中是如何损失磁通量和角动量的? 大质量恒星是如何形成的? 与 YSOs (Young Steller Objects) 相联系的原恒星盘、喷流和外流的性质如何以及它们的动力学是如何演化的? 在星团尺度上, 恒星的大系统 (如星团) 是如何形成的。需要回答的有: 什么样的物理过程决定了恒星形成区域的物理性质? 初始质量函数由什么确定? 恒星形成率由什么决定?

要从恒星尺度和星团尺度回答与恒星形成的相关问题时, 两个反馈效应显得尤为重要。

(1) 辐射反馈。大质量恒星拥有远比小质量恒星高的光度和温度, 它们的辐射反馈可以体现在如下几个方面: 对星周环境的辐射加热、对氢分子的瓦解或氢的电离, 以及作用于尘埃的辐射压力。在球状吸积的情况下, 辐射力和引力之比为 $7.7 \times 10^{-5} \kappa_0 (L/M)_0$, κ_0 是高斯制下的气体不透明度, $(L/M)_0$ 是以 L_{\odot}/M_{\odot} 为单位的恒星光度质量比。对于大质量原恒星的尘埃壳层, $\kappa_0 \simeq 0$; 当 $(L/M)_0 \geq 2500$, 辐射力就大于引力。约 $20 M_{\odot}$ 的主序星可以达到这一值, 这意味着在大质量的恒星形成过程中辐射反馈尤为显著。

(2) 源于恒星风 (源于恒星表面) 和原恒星的外流 (因吸积而形成的磁驱动外流) 的力学反馈。一旦恒星表面温度超过约 2.5×10^4 K, 辐射驱动的高速 (约 $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 恒星风就会产生^[5, 6]。约 $40 M_{\odot}$ 的零龄主序星可以达到这一温度。恒星风所携带的动量约为恒星辐射场携带的一半, 如果辐射不能有效地终止吸积, 那么恒星风也不能。然而, 高速的恒星风扫过吸积流, 形成激波, 波后温度 (post-shock temperature) 高达 10^7 K 以上, 从而加热气体, 有可能进一步干扰吸积过程。

无论从恒星尺度还是从星团尺度研究恒星形成, 解析的研究难以胜任, 只能进行定性的分析, 给出一些粗糙的判据, 因此数值模拟成为不可替代的手段。辐射和磁场扮演着重要的作用, 耦合辐射转移的流体 (Radiation Hydrodynamics, RHD)、磁流体 (Radiation Magnetohydrodynamics, RMHD) 的模拟研究更是成为恒星形成研究发展的需要。

第 2 章介绍恒星形成的数值模拟研究进展; 第 3 章介绍在该领域国内的研究现状和发展 RMHD 程序应该具备的特征; 第 4 章阐述对国内天文界发展适用于该领域的 RMHD 程序的建议。

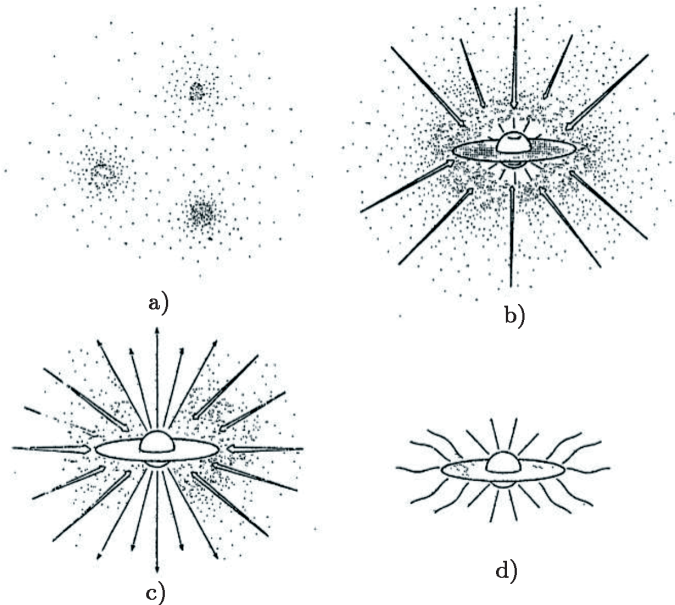
2 数值模拟研究进展

利用数值模拟研究恒星形成主要有两类数值模拟: (1) Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)^[7, 8]; (2) 基于自适应网格 (Adaptive Mesh Refinement, AMR) 的流体、磁流体模拟。

由于辐射在恒星形成中所扮演的重要作用, 耦合辐射的流体、磁流体模拟也成为目前研究的重要手段^[9, 10]。在模拟尺度上, 一种是单星系统的尺度, 模拟中通常包含约 $100 M_{\odot}$ 量级的气体云, 主要研究单个大质量恒星的形成^[9, 10]; 另一种是星团的尺度, 模拟中通常包含约 $1000 M_{\odot}$ 量级的气体云, 主要研究星云的破碎和坍缩、星团 (star clusters) 的形成^[11] 和 IMF 的成因^[12, 13]。总体看来, 恒星形成的数值模拟起步虽然晚, 但起点高。在 2010 年后, 这个领域的研究基本都开始进行基于自适应网格的 RHD 和 RMHD 的三维模拟研究, 并且也推动了恒星形成研究的大发展。这些模拟研究大部分都是基于 FLD (Flux Limited Diffusion) 近似来处理辐射转移过程。在 FLD 方法中, 辐射流量正比于辐射能量密度的梯度。这种假设在光学厚的区域是近似成立的。FLD 方法再通过桥梁公式连接光学厚和光学薄区域, 但是不能较好地处理从光学厚到光学薄的过度区域内的辐射转移问题, 不同的桥梁公式在过度区域有一定的差别^[14]。

2.1 原恒星核坍缩的模拟研究

基于在观测和理论上对一颗恒星形成过程的认识, Shu 等人^[15] 提出一颗单星的形成过程。正如图 1 展示的, 从凝聚成团的缓慢旋转的星云中气体核开始形成 (图 1 a)), 通过 ambipolar diffusion (中性粒子从等粒子体中脱耦, 电子和离子都与磁场耦合) 损失磁能和湍动能, 气体核坍缩形成带有星周盘的原恒星 (图 1 b)), 进而产生双极外流 (图 1 c)), 之后物质下落终止, 形成带有星周盘的恒星 (图 1 d))。对于这样的一个形成过程, 从 20 世纪 60 年代末就开始了模拟研究。



注: a) 气体核的形成; b) 带星周盘的原恒星的形成; c) 原恒星产生双极外流; d) 下落物质终止, 形成带星周盘的恒星。

图 1 恒星形成的四个阶段^[15]

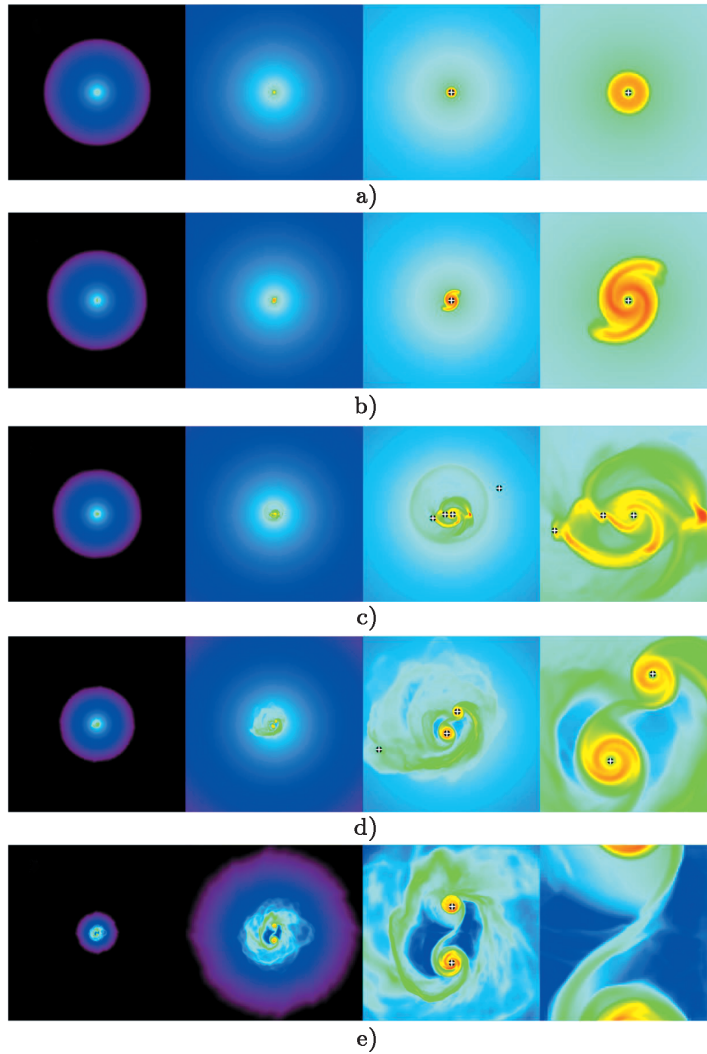
1969 年, Larson 等人^[16]基于辐射转移的扩散近似, 用 1D 辐射流体模拟研究了从分子云核到原恒星核的演化过程。Stahler 等人^[17-19]、Masunaga 和 Inutsuka^[20]在球对称的假设下开展了一系列的辐射流体的模拟研究。Tomisaka^[21-23]考虑了磁场的因素, 并在轴对称的假设下做了二维 MHD 的模拟研究。目前, 已发展到耦合辐射和磁场的 RMHD 模拟。Tomida 等人^[24, 25]考虑了磁场和辐射转移两种的因素, 完成了原恒星核坍缩的三维 RMHD 数值模拟, 他们主要关注了原恒星核坍缩过程中角动量的转移和重新分布, 这是理解星周盘形成的关键。

2.2 大质量恒星形成的模拟研究

根据经典的 Jeans 判据, 星云质量大于 Jeans 质量 $M_J = 0.5 \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{n}{10^4 \text{ cm}^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}} M_{\odot}$ (T 和 n 分别是星云温度和分子数密度), 星云将发生引力不稳定而坍缩。这意味着, 发生引力不稳定的大星云将破碎, 形成与 Jeans 质量相当的气体核。这不利于形成大质量的恒星。在观测上, 已经发现了 $120 M_{\odot}$ 的恒星。这样大质量的恒星是如何形成的成为人们关注的课题。目前, 有两类模型, 即碰撞模型和吸积模型, 用于解释大质量恒星的形成。碰撞模型是中小质量的恒星通过并合形成大质量的恒星, 该模型面临的问题是如何解决恒星碰撞频率低的问题。吸积模型是小质量的原恒星通过吸积周围的物质使自身质量不断增长, 从而形成大质量的恒星。目前, 在恒星形成的模拟研究中, 辐射流体或磁流体的模拟主要是用于研究吸积模型。

吸积过程的研究需要考虑辐射和恒星风的反馈效应。单纯的球吸积, $20 M_{\odot}$ 的原恒星能产生足够强的辐射从而终止物质的吸积^[26]。非球对称的吸积, 原恒星质量到达约 $40 M_{\odot}$, 辐射仍然可以终止物质的吸积^[27]。Krumholz 等人^[9]基于 FLD 的 RHD 数值模拟研究表明, 约 $40 M_{\odot}$ 的原恒星可以通过从星周盘吸积形成。这主要源于辐射驱动的 Reyleigh-Taylor 不稳定性。Reyleigh-Taylor 不稳定发生在两种不同密度流体的界面上, 当在重力场 (或净的加速度) 中低密流体推动高密流体时, Reyleigh-Taylor 不稳定性发展, 便会出现不同密度流体之间的渗透。Krumholz 等人^[9]通过模拟发现, 物质可以绕过辐射驱动的辐射泡最终掉入到星周盘, 从而使恒星通过从星周盘吸积物质而使恒星质量不断增长。图 2 展示了 Krumholz 等人的模拟结果^[9]。模拟结果显示 $100 M_{\odot}$ 的星云最终形成了一个双星系统, 质量分别为 $41.9 M_{\odot}$ 和 $29.2 M_{\odot}$ 。

Krumholz 等人^[9]利用模拟的方法获得了 $41.9 M_{\odot}$ 质量的恒星, 说明吸积模型有助于形成大质量恒星, 然而模拟结果也面临质疑。为了弥补 FLD 方法在从光学厚到光学薄的过度区域所引入的不精确性, Kuiper 等人^[28]采用 Ray-tracing+FLD 的混合方法处理星周物质内的辐射转移。在 Kuiper 等人^[28]所采用的 Ray-tracing+FLD 方法中, 用 Ray-tracing 方法 (沿着所考察的光线积分辐射转移方程)^[29, 30]处理星周环境对于来自恒星辐射的吸收, 而用 FLD 方法处理再发射。Kuiper 等人^[28]并没有发现 Reyleigh-Taylor 不稳定性。这种差异可能源于, 单纯 FLD 的方法严重低估了吸收系数, 使 Krumholz 等人^[9]所采用的 FLD 方法对辐射力低估了两个量级^[28]。在数值模拟中, 所采用的具体辐射转移过程对最后的结果有非常大影响。在 Krumholz 等人^[9]和 Kuiper 等人^[28]的研究中都没有包含光致电离的效应。因此, 更为细



注: 从上到下的图显示不同时刻的密度分布: a) 17.5 ka; b) 25.0 ka; c) 34.0 ka; d) 41.7 ka; e) 55.9 ka。从左到右的图显示的不同尺度上的密度分布。最左边的图显示的是 $(0.3 \text{ pc})^2$ 区域, 最右边的图显示的局域 $(966 \text{ AU})^2$ 的区域; 从左到右, 每列图所显示的区域尺度依次放大 4 倍。模拟结果显示 $100 M_{\odot}$ 的星云最终形成了一个双星系统, 质量分别为 $41.9 M_{\odot}$ 和 $29.2 M_{\odot}$ 。

图 2 $100 M_{\odot}$ 气体云演化的瞬时密度图^[9]

致的处理辐射转移过程,有助于研究吸积过程能否形成大质量恒星。另一方面,在 Krumholz 等人^[9]的模拟中,网格的最小分辨率为 10 AU,不能分辨 10 AU 内发生的物理过程。10 AU 差不多是原恒星核坍缩的研究尺度,如 Tomida 等人^[25]的计算区域就是约 20 AU 内。

2.3 星云破碎和坍缩、星团形成和初始质量函数 (IMF) 的模拟研究

星团被认为在较短的时间内几乎同时形成于同一块的大分子云。在星团内恒星的相对数量与恒星质量的关系可以用 IMF 来描述^[3]。解释 IMF 是理解星团形成的重要方面。IMF 在一定程度上取决于分子云破碎而坍缩形成气体核的过程。破碎形成的较小分子云的特征质量被认为正比于 Jeans 质量。对于球状、等温分子云,Jeans 质量 $M_J \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$, ρ 和 T 分别是气体密度和温度。在等温的分子云中,当分子云因坍缩而密度增加时, M_J 可以达到任意小的值。这样等温分子云可以破碎为任意小质量的碎片,然而在分子云中的湍流可能会改变这一过程,从而决定 IMF 的分布^[31]。另一方面,为了解释分子云破碎的尺度和 IMF,非等温的分子云模型被广泛研究。

一系列的数值模拟研究了分子云的破碎过程和 IMF。Bonnell 等人^[7]和 Dobbs 等人^[8]仅用流体(基于 SPH)的模拟发现,坍缩的气体云总会破碎形成初始质量约为 $0.1 M_{\odot}$ 的恒星,通过吸积进一步形成大质量的恒星。事实上,分子云的温度分布会强烈影响大分子云的破碎和 IMF。来自嵌入在星云内的恒星的辐射反馈在决定 IMF 过程中起重要的作用。Krumholz 等人的系列基于 RHD 的模拟研究表明^[12, 13, 32],源自于原恒星的辐射反馈会增加 Jeans 质量并且有效地抑制分子云破碎。Krumholz 等人^[13]模拟研究了类 Orion 星团的形成。在他们的模拟中,产生了 150 多个正常恒星和褐矮星,质量分布在约小于 $0.1 M_{\odot}$ 到约大于 $10 M_{\odot}$ 之间,产生的 IMF 与 Orion 星团的一致。Hennebelle 等人^[33]的模拟研究表明,磁场也可以抑制分子云破碎。Commercon 等人^[10]和 Myers 等人^[34]的研究表明,同时包括辐射和磁场的模拟比仅包括磁场或仅包括辐射时更能有效抑制分子云破碎。

3 国内的现状和需求

从文献检索来看,国内还没有研究人员利用 RMHD 从事恒星形成的数值模拟研究,在这个领域国内的研究还是空白。一个重要的方面是缺乏可靠、高效的 RMHD 程序;另一方面也缺乏恒星形成的数值模拟研究方面的经验。在该领域从事 RMHD 的数值模拟研究, RMHD 程序除了能高效、高精度地处理 HD、MHD 外,还应该具有如下特征。

(1) 具备计算三维流体的功能。目前该领域的模拟研究基本上都是在三维空间内完成的。

(2) 自引力。恒星形成过程中,自引力是主导因素,这个功能必不可少。

(3) 网格自适应。星云破碎、坍缩而形成大量的原恒星,在这个过程中,计算的区域大部分会演化为低密度区,原恒星只占少量的区域,却是计算所关注的重点区域,因此需要网格自适应功能减少计算量。对于原恒星核坍缩的研究,这个功能效果一般。

(4) 本领域的模拟对象电离度较低,可以考虑包括非理想磁流体的效应,如 Ambipolar diffusion 和 Ohmic resistivity (源于电子与中性粒子的碰撞)。目前在模拟研究分子云的破碎、

坍缩过程都没有包括非理想磁流体的效应。

(5) 辐射转移。这应该是 RMHD 程序的核心功能。在已有的公开程序中, 大部分程序都能比较好地处理辐射转移以外的其他功能, 这些程序都可以作为借鉴, 但是包含辐射转移模块的程序却少有公开的, 公开的程序基本上是基于 FLD 方法的。在恒星形成的模拟研究中, 大多是耦合了辐射转移的流体、磁流体的 3D 模拟, 它们在处理辐射转移时的不足之处在于: 1) 没有任何一个模拟研究中包括所有的辐射转移过程, 例如光致电离效应和作用于尘埃的辐射力及其相应的辐射转移过程。对于大质量恒星, 它拥有远比小质量恒星更高的光度和温度, 从而产生强的紫外辐射。紫外辐射会产生光致电离效应。另一方面, 星周环境中也含有大量的尘埃, 来自原恒星的辐射会对尘埃产生强辐射力。这些重要的过程仅仅被孤立地研究, 它们的相对重要性仍然不清楚。2) 恒星形成的模拟研究中, 对辐射场的处理是考虑对频率积分后的辐射场, 并没有分波段考虑辐射场。事实上, 恒星形成于多样性的环境中。这些形成环境的物质构成不同, 对于不同波段的辐射场, 其吸收和发射的能力是不同的。例如分子和尘埃对不同波段辐射的吸收和发射能力是不同的。3) 在恒星形成的模拟研究方面, 处理辐射转移时, 主要采用 FLD 近似。FLD 近似能较好地处理光学薄和光学厚的情况, 但介于两者之间时较差。

4 本研究领域内 RMHD 发展的策略

由于 MHD、自引力和自适应该网格等的处理已十分成熟, 这里主要介绍本领域中辐射转移的处理和相应的策略。

目前, 耦合到流体、磁流体的辐射转移处理方法大致有: (1) FLD 方法^[35]。(2) Short Characteristics 方法^[36]。在计算区域的每个网格中心上, 将特征辐射强度离散成一组射线, 沿着每根射线求解辐射转移方程。这样只在局域网格上求解辐射转移方程。(3) M1 closure 方法^[37]。(4) A Variable Eddington Tensor (VET) 方法^[38]。在方法 (3) 和 (4) 中, 特征辐射强度的零阶动量 (辐射能量密度) 和一阶动量 (辐射流量) 方程不闭合, 需要 Eddington 张量建立辐射强度的零阶动量和二阶动量 (辐射压张量) 的关系。在 M1 closure 方法中, 利用 Eddington 因子获得 Eddington 张量。在 VET 方法中, 直接从特征辐射强度的角向积分计算得到 Eddington 张量。相比较而言, VET 方法更为精确。(5) Monte Carlo 方法^[39, 40]。这是一种随机模拟辐射转移的方法。在这些方法中应用最广的还是 FLD 方法, 其它的方法也逐步地开始在天体物理的模拟中应用。比较 (1)—(4) 种方法, FLD 方法实现容易, 计算量小, 适用于各向同性的光学厚或光学薄环境。Monte Carlo 方法耦合动力学也逐渐发展成熟, 也逐步开始用于天体物理研究中的模拟。它的优势是可以灵活地处理各种辐射转移问题, 从单色到多波段的扩展十分容易, 缺点是在光学厚区域计算代价大, 但已有一些方法发展起来试图克服这一问题。Densmore 等人^[41]发展了新的 Discrete Diffusion Monte Carlo (DDMC) 技术来提高在光学厚区域的计算效率。在 DDMC 方法中, 根据离散的扩散方程, 光子在各网格间完成离散步。这样每一步取代了众多较小的 Monte Carlo 步, 从而提高了计算效率。

从恒星形成的数值模拟研究方向进行统计, FLD 方法应用得最多, 也有研究者开始用 Monte Carlo 方法。如果国内天文界打算开发 RMHD 程序用于研究恒星形成, 在辐射转移的处理上, 个人建议两种方案: 1) 采用 FLD 扩散近似可以尽快实现程序的辐射转移模块, 这样的处理已经可以应用于大量的天体物理课题。在取得一定的研究成果和研究经验后, 再逐步扩展程序, 仔细地处理辐射过程。2) 直接采用 Monte Carlo 方法。由于不同研究领域, 在处理辐射转移上侧重点不同, 其他方法不能有效地适用于各类问题, 这正是 Monte Carlo 方法的优势。另一方面, Monte Carlo 方法可以方便地实现从单色到多色的扩展。在恒星形成的研究领域内, 也可以相对容易地解决前人处理辐射转移时的不足之处, 有助于取得有影响力的成果。

参考文献:

- [1] 汪景琇, 袁峰, 陈鹏飞, 等. 天文学进展, 2016, 34: 365
- [2] Salpeter E E. *ApJ*, 1955, 121: 161
- [3] Bastian N, Covey K R, Meyer M R. *ARA&A*, 2010, 48: 339
- [4] Figer D F. *Nature*, 2005, 434: 192
- [5] Leitherer C, Robert C, Drissen L. *ApJ*, 1992, 13: 190
- [6] Vink J S, de Koter A, Lamers H J G L M. *A&A*, 2000, 362: 295
- [7] Bonnell I A, Vine S G, Bate M R. *MNRAS*, 2004, 349: 735
- [8] Dobbs C L, Bonnell I A, Clark P C. *MNRAS*, 2005, 360: 2
- [9] Krumholz M R, Klein R I, McKee C F, et al. *Science*, 2009, 323: 754
- [10] Commerçon B, Hennebelle P, Henning T. *ApJL*, 2011, 742: L9
- [11] Myers A T, Klein R I, Krumholz M R, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 3420
- [12] Krumholz M R, Cunningham A J, Klein R I, et al. *ApJ*, 2010, 713: 1120
- [13] Krumholz M R, Klein R I, McKee C F. *ApJ*, 2012, 754: 71
- [14] Turner N J, Stone J M. *ApJS*, 2001, 135: 95
- [15] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23
- [16] Larson R B. *MNRAS*, 1969, 145: 271
- [17] Stahler S W, Shu F H, Taam R E. *ApJ*, 1980, 241: 637
- [18] Stahler S W, Shu F H, Taam R E. *ApJ*, 1980, 241: 226
- [19] Stahler S W, Shu F H, Taam R E. *ApJ*, 1981, 248: 727
- [20] Masunaga H, Inutsuka S. *ApJ*, 2000, 531: 350
- [21] Tomisaka K. *ApJ*, 1998, 502: 163
- [22] Tomisaka K. *ApJ*, 2000, 528: 41
- [23] Tomisaka K. *ApJ*, 2002, 575: 306
- [24] Tomida K, Tomisaka K, Matsumoto T, et al. *ApJ*, 2013, 76: 6
- [25] Tomida K, Okuzumi S, Machida M, et al. *ApJ*, 2015, 801: 117
- [26] Wolfire M G, Cassinelli J P. *ApJ*, 1987, 319: 850
- [27] Yorke H W, Sonnhalter C. *ApJ*, 2002, 569: 846
- [28] Kuiper R, Klahr H, Beuther H, et al. *A&A*, 2012, 537: 112
- [29] Steinacker J, Henning T, Bacmann A, Semenov D. *A&A*, 2003, 401: 405
- [30] Efstathiou A, Rowan-Robinson M. *MNRAS*, 1990, 245: 275
- [31] Padoan P, Nordlund Å. *ApJ*, 2002, 576: 870
- [32] Krumholz M R, Klein R I, McKee C F. *ApJ*, 2007, 656: 959

- [33] Hennebelle P, Commercon B, Joos M, et al. *A&A*, 2011, 528: 72
- [34] Myers A, et al. *ApJ*, 2013, 766: 97
- [35] Hayes J C, Norman M L, Fiedler R A, et al. *ApJS*, 2006, 165: 188
- [36] Davis S W, Stone J M, Jiang Y F. *ApJS*, 2012, 199: 9
- [37] González M, Audit E, Huynh P. *A&A*, 2007, 464: 429
- [38] Jiang Y F, Stone J M, Davis S W. *ApJS*, 2012, 199: 14
- [39] Harries T J. *MNRAS*, 2011, 416: 1500
- [40] Roth N, Kasen D. *ApJS*, 2015, 217: 9
- [41] Densmore J D, Thompson K G, Urbatsch T J. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231: 6924

Research Progress in Numerical Simulation Study of Star Formation Based on Radiation Hydrodynamics (Magnetohydrodynamics)

YANG Xiao-hong

(Department of Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Stars are one of the most important objects in the universe and study of star formation is an important research subject. Astronomers are trying to understand a series of problems associated with star formation, which include how massive stars and star cluster form, what processes determines the physical properties of star-forming region, what determines the initial mass function, what determines the star formation rate, and so on. Recently, numerical simulations of star formation continues to make progress. This paper focuses on research progress in the numerical study of protostellar collapse, massive star formation, fragmentation and collapse of molecular cloud, star cluster formation and the initial mass function, based on radiation hydrodynamics (magnetohydrodynamics).

Key words: star formation; radiative transfer; numerical simulation