

原太阳吸积盘模型及结构

余观夏¹, 张国防², 黄克谅²

(1. 南京林业大学信息工程学院, 南京 210037)

(2. 南京师范大学物理科学与技术学院, 南京 210097)

[摘要] 在标准的 α 模型基础上, 运用不同的对流和辐射理论, 计算和比较原太阳吸积盘在粘滞演化阶段的径向和垂直结构. 结果表明, 扩散近似和混合程理论在原太阳吸积盘的构造中是很好的能量转移方程和对流理论.

[关键词] 吸积盘; 对流; 辐射; 结构

[中图分类号] P144; [文献标识码] A; [文章编号] 1001-4616(2001)02-0037-05

0 引言

现在普遍认为太阳及其行星系统是在约 46 亿年前从一个扁平旋转的气体星云演化而来的. 太阳星云的演化从时间上可分为三个相互重叠的阶段: 塌缩阶段、粘滞阶段、清除阶段, 不同阶段的盘结构由不同的物理机制所决定^[1].

本文主要讨论原太阳粘滞演化阶段的物理结构. 在这一阶段, 通过粘滞产生的内部扭矩决定星云中物质的质量和角动量的再分布.

在质量和角动量转移的过程中, 剪切运动产生能量以对流和辐射两种机制向外传输. 在原太阳吸积盘模型的研究中, 辐射模型一般采用扩散近似方法处理, 对流模型一般采用局域混合程理论^[2]. 这两种模型形式较为简单, 给计算带来很大方便. 1997 年刘文洁、黄克谅运用这两种理论计算了原太阳的结构^[3]. 但是这两种模型的不足也是很显然, 扩散近似方法在处理径向盘边缘和垂直表面这些光学薄的区域是不合适的, 同时在把对流作为湍动粘滞的来源时, 局域混合程理论并没有包含对流的一些重要特征. 因此近年来在研究吸积盘的过程中对原有的理论进行了修正或提出了新的理论, 如 1987 年 Cabot 等人提出的对流理论^[4], 1990 年 Bodenheimer 等人提出的辐射理论^[5]. 本文在标准的 α 模型基础上, 计算和比较了原太阳吸积盘模型及结构.

1 模型

假设盘是几何薄盘($z/r \ll 1$)处于稳态, 作开普勒旋转, 并假设盘中气体和尘埃充分混合, 且是热耦合的, 由粘滞耗散加热, 通过对流和辐射机制转移能量. 为便于讨论和计算, 把径向和垂直结构作为独立的问题来处理, 忽略其自身引力和径向能量传输, 忽略中心原太阳对盘的辐射的影响. 设盘中各处的吸积率一样, 采用 Shakura & Sunyaev 标准 α 模型.

收稿日期 2000-04-13

作者简介 余观夏, 1968—, 南京林业大学信息工程学院讲师, 主要从事天体物理的教学与研究.

1.1 产能机制

盘作开普勒旋转,由于粘滞存在,剪切运动中每单位质量的局域粘滞引起的能量耗散率为:

$$\frac{dF}{dz} = \frac{9}{4} \nu \rho \omega^2 = \frac{3}{2} \alpha \omega \rho,$$

其中 F 是辐射流, ρ 是密度, ν 是有效粘滞系数, ω 是开普勒运动角速度.

1.2 能量转移机制

在我们所讨论的盘中,能量向外传输主要通过对流和辐射机制.用史瓦西判据来判断盘中是否存在对流.当 $\nabla_{\text{rad}} \leq \nabla_{\text{ad}}$ 时(∇_{rad} 是温度梯度; ∇_{ad} 是绝热温度梯度,在冷的原太阳吸积盘中一般约取 0.4)辐射为主要能量传输机制.如果把整个盘作为光学厚的,采用扩散近似方法处理(以下简称 D 理论)则能量转移方程为:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{3\kappa\rho}{4acT^2} F,$$

其中 κ 是 Rosseland 平均光深, a 是斯特藩常数, T 是温度,由于原太阳是一个冷盘,其不透明度主要由尘埃微粒引起, Rosseland 平均光深的取值根据文献 [1].

但实际的盘中,在径向的盘外区和垂直方向的盘表面通常是光学薄的,对于一个整体盘,扩散近似在这些区域是不适用的,我们采用在光学薄和光学厚的情况下均适用的公式(以下简称 P 理论)^[5]:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\kappa\rho}{3ac\lambda T^3} F,$$

其中 λ 是流限(flux-limiter).

当 $\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}$ 时,盘中存在对流,通常的对流传能采用的是局域混合程理论(以下简称 M 理论),即

$$\frac{dT}{dz} = \frac{g_z \rho T}{P} \nabla_{\text{conv}},$$

其中 g_z 是中心原太阳引起的垂直方向的重力加速度, ∇_{conv} 是实际的温度梯度^[5].

当考虑盘中对流及对流中涡旋的主要影响时, Cabot 等人^[4]针对吸积盘中的大尺度湍动提出新的对流理论(以下简称 C 理论),得到另一个能量转移方程,即

$$\frac{dT}{dz} = -\left(\frac{F}{c_p \rho \chi_t} + \frac{\mu g}{R} \nabla_{\text{ad}}\right),$$

其中 c_p 为等压热容, χ_t 为热流传导率.根据上述辐射和对流方程,可以构成四种辐射和对流模型,分别称为 MD 模型、MP 模型、CD 模型、CP 模型.

1.3 方程及边界条件

我们所采用的盘结构的方程有:物态方程、流体静力学方程、产能方程和能量转移方程.解这组方程采用的边界条件是:在盘中心($z = 0$)辐射流等于 0,在盘表面($z = z_s$)辐射流为:

$$F = \frac{3GM_* \dot{M}}{8\pi r^3} (1 - \sqrt{R_*/r}),$$

其中 \dot{M} 为吸积率, M_* 为中心原太阳质量, R_* 为原太阳半径,计算中取为一个太阳半径.表面温度: $T = (F/\sigma)^{1/4}$.

另外,我们还采用一个比较熟悉的公式作为边界条件:

$$\int_{-z_s}^{z_s} \nu \rho dz = \frac{\dot{M}}{3\pi} (1 - \sqrt{R_*/r}).$$

本文采用双边值打靶法求解上述方程.

2 结果及讨论

我们取 $\alpha = 0.01$, $M_* = M_\odot$, 吸积率 $\dot{M} = 6.34 \times 10^{18} \text{ g/a}$, 计算并比较 MD、MP、CD 及 CP 四种不同模型的盘的径向(见图 1)和垂直结构(见图 2).

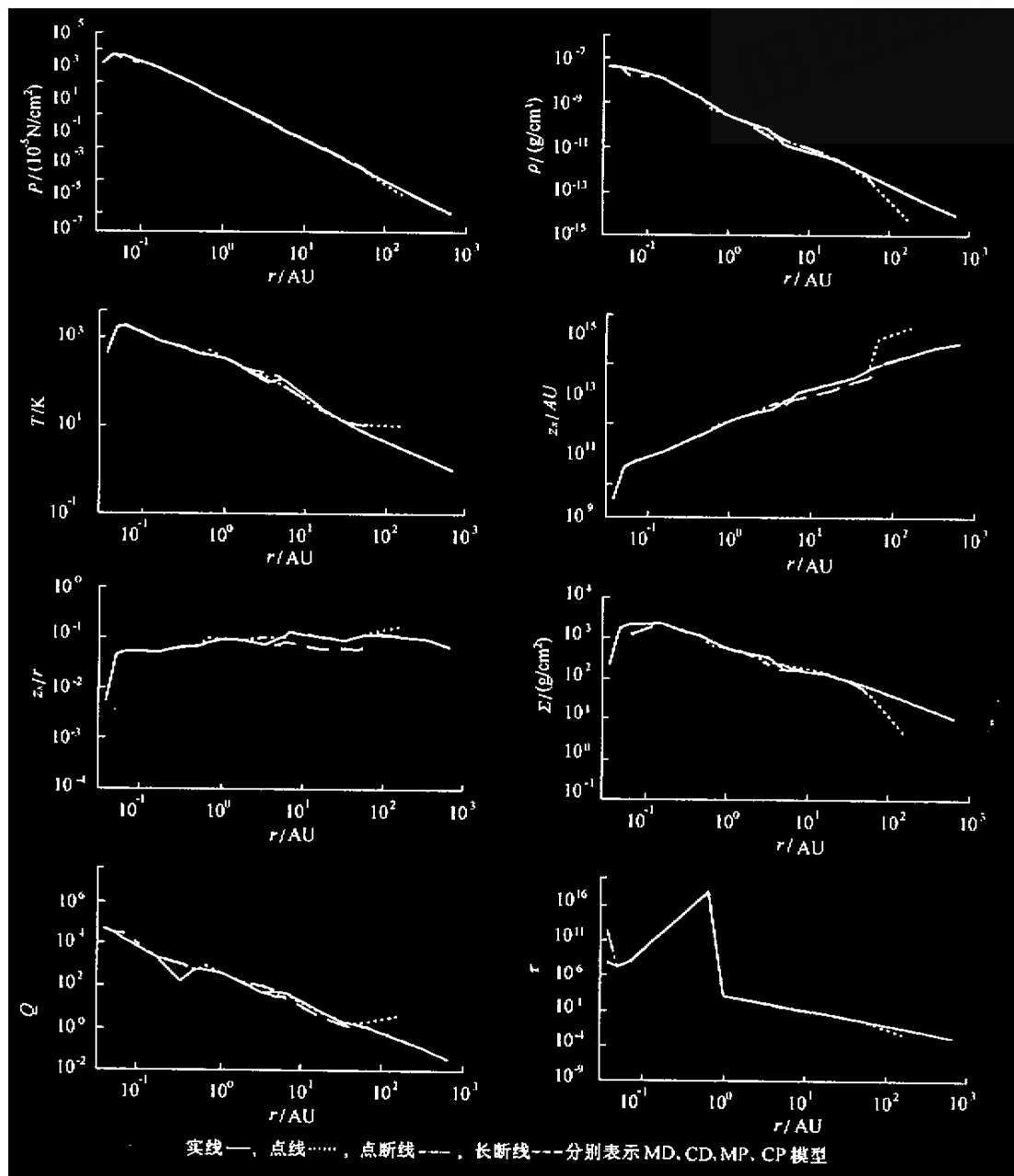


图 1 不同模型盘中心的径向结构

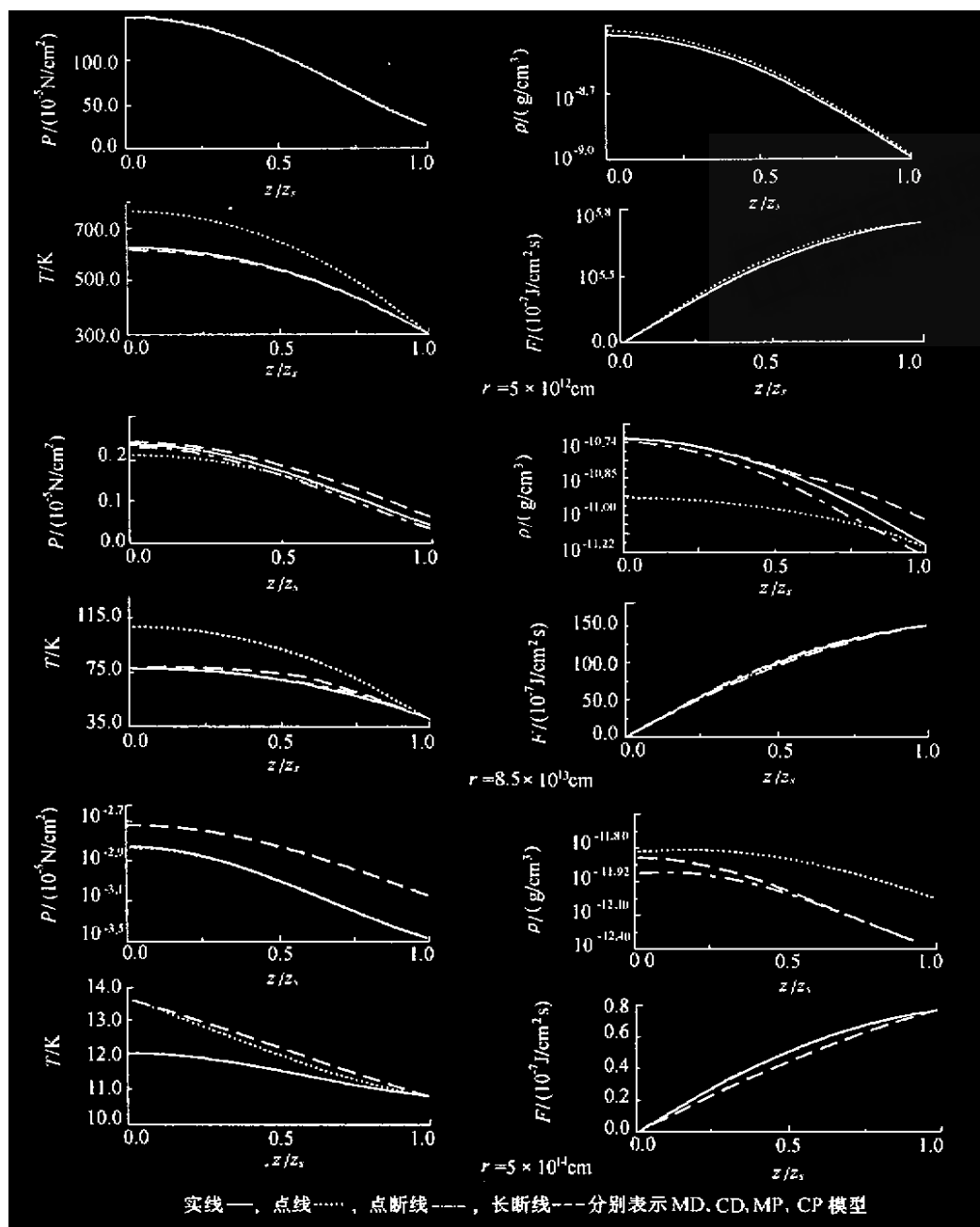


图 2 不同模型在不同区域的垂直结构

图 1 中的纵坐标是中心平面物理量随径向位置 r 的变化关系, 其中 P 是压强, ρ 是密度, T 是温度, z_s 是厚度, z_s/r 是相对厚度, Σ 是中心面密度, Q 是稳定性参数, τ 是光深。

从图 1 可看出 (1) 四种不同模型的中心平面物理量随径向位置的变化趋势基本一致, 除了在盘外区有分歧外, 在盘内区几乎一致。(2) 几乎在所有的位置, 四种模型的 $z_s/r < 0.1$, 从而证实了我们的薄盘假设的合理性。(3) Q 参数描述的是盘对引力扰动的稳定性, 当 $Q \gg 1$ 时, 盘对轴对称的引力扰动是稳定的。图中四种模型在盘内区 ($r < 60 \text{ AU}$) 均有 $Q \gg 1$, 从而也证实

了小尺度的引力湍动不可能成为原太阳吸积盘的主要粘滞机制。(4)当 $\tau > 1$ 时盘中存在对流, $\tau < 1$ 时,对流将终结。结果显示,随着 r 的变化,盘中存在一个从有对流区到对流过渡区再到对流终结区的变化。但进一步的结果显示,不同模型三个区域的位置有区别。

图 2 对应于三种不同位置(分别为 $r = 5 \times 10^{12}$ cm 对流区, $r = 8.5 \times 10^{13}$ cm 对流过渡区, $r = 5 \times 10^{14}$ cm 无对流区)的垂直结构。结果显示在盘内区也几乎有相同的规律,在盘外区发生部分分歧。

我们运用标准 α 吸积盘模型,在不同的对流和辐射理论下得到各自原太阳结构。结果表明四种不同的模型均能得到稳定的薄盘结构,薄盘假设是合理的,且均可忽略中心原太阳的辐射。在原太阳这样一个具体的吸积盘模型中混合程理论(M 模型)和扩散近似(D 模型)是比较合理且简单的能量转移理论。

[参考文献]

- [1] Ruden S P, Pollack J B. The Dynamical Evolution of the Protosolar Nebula[J]. APJ, 1991, 375: 740—760.
- [2] 黄润乾. 恒星物理[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 40—75.
- [3] 刘文洁, 黄克谅. 原太阳吸积盘的结构[J]. 南京师大学报(自然科学版), 1999, 22(1): 18—22.
- [4] Cabot W, Canuto V M, Hubickyj O, et al. The Role of Turbulent Convection in the Primitive Solar Nebula[J]. ICARUS, 1987, 69: 387—457.
- [5] Peter Bodenheimer, Harold Yorke W, et al. The Formation Phase of the Solar Nebula[J]. APJ, 1990, 355: 651—660.

Model and Structure of Protosolar Accretion Disk

Yu Guanxia¹, Zhang Guofang², Huang Keliang²

(1. College of Information Engineering, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, PRC)

(2. College of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, PRC)

Abstract By means of standard α -Accretion disk model using different convection and radiation theory, radial and vertical structure of protosolar accretion disk during diffusion stage was calculated and compared.

Key words accretion disk; convection; radiation; structure

[责任编辑: 丁蓉]