

关于恒星大气超声对流的注释*

熊大润^{1†} 邓李才²

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)

关键词 对流, 恒星, 大气

中图分类号: P 152; 文献标识码: A

1 引言

尽管有诸多的不满之处, 由于其物理上的直观性和应用上的简单性, 至今混合长理论^[1] 仍几乎是唯一一个广泛用于恒星结构、演化和脉动计算的恒星对流理论. 混合长理论预言, 在红、黄巨星和超巨星大气中, 对流是超声速的. 我们曾指出, 混合长理论隐含了一个假定, 对流是亚声速的. 对于超声速对流, 无论从物理的真实性, 还是从混合长公式的数学表述来看, 混合长理论都是不正确的^[2]. 因此超声对流的真实性是存在问题的. 蔡涛^[3-4] 以及 Xiong 等^[5] 曾研究过这个问题. 但在非局部对流理论下, 我们并没有能在恒星大气中找到超声速对流^[5]. 我们的研究是不够完全的. 由于非局部对流数值计算的困难性, 我们的非局部对流模型未能覆盖整个 H-R 图. 在 H-R 图某些重要区域, 我们的非局部对流模型存在缺失. 如今非局部对流理论的数值计算已取得了某些进展, 这有可能使得我们能较之前更完全地重新研究此问题. 在第 2 节给出了新的数值计算结果, 第 3 节是小结.

2 数值结果

利用我们的非局部对流理论^[6], 计算了一系列质量为 $1 \sim 30 M_{\odot}$ 恒星演化序的局部和非局部对流的包层模型. 本工作采用 MHD 状态方程^[7-9] 和 OPAL 不透明度^[10], 在 $T < 10^4$ K 的低温区域, 补充了 Alexander 和 Ferguson 的低温不透明度表^[11]. 表面边界置于光深 10^{-2} 处, 而底部边界放置得足够深, 它处于对流区之下的辐射区. 依赖于恒星的有效温度和光度, 底部边界的温度约为 $10^6 \sim 6 \times 10^6$ K. 计算用的基本方程和边界条件可参考作者先前的工作^[12].

图 1 绘出了对流运动最大的马赫数在 H-R 图上的分布. 图 1(a) 和 (b) 分别是局部对流和非局部对流的模型. 图中实心圆点和中空圆圈分别代表亚声速和超声速对流, 圆点和圆圈的大小正比于马赫数, 见图左下部所示.

2010-09-29 收到原稿

* 国家自然科学基金项目 (11073053, 10973015) 资助

† xiongdr@pmo.ac.cn

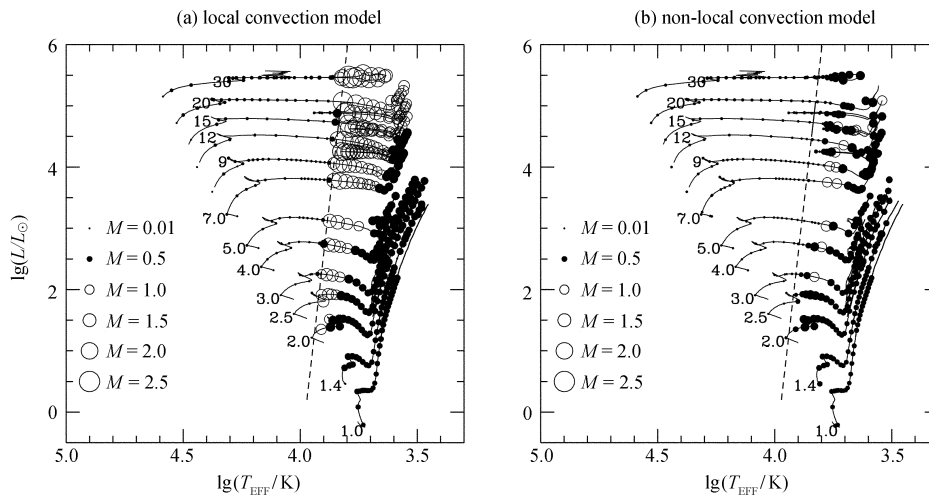


图 1 恒星大气对流运动最大的马赫数在 H-R 图上的分布. 图中虚线是理论的造父变星不稳定区蓝边界

Fig. 1 The distribution of the maximum Mach numbers of convective velocity in the stellar atmosphere on the H-R diagram. The dashed lines are the blue edge of Cepheid instability strip

从图 1(a) 可知, 在局部对流理论下, 在红、黄巨星和超巨星大气中, 对流是强超声速的, 最大的马赫数可以达到大约 3.

将图 1(b) 同图 1(a) 比较可知, 当恢复对流的正常非局部处理, 对流运动速度就大大降低了. 在我们先前的工作中已经详细研究和讨论过, 这种降低是由于非局部对流扩散所致^[5]. 对绝大多数恒星, 对流变成亚声速的. 局部混合长理论严重地高估了恒星大气的湍动对流运动的速度, 特别对黄的巨星和超巨星是如此. 黄的巨星和超巨星的减小要远甚于红巨星. 幸运的是, 在黄的巨星和超巨星大气中, 对流传能效率极低, 对流区厚度也很薄, 所以对流对他们的内部结构和演化不会有重要的影响. 然而由于他们的大气中, 巨大的湍流压通过对流与脉动的动力学耦合, 对流对他们脉动稳定性的影响可能是不可忽略的. 图 1(a) 和 (b) 中虚线是理论的造父变星脉动不稳定区蓝边界. 从图中可见, 此蓝边界也正好是超声对流的蓝边界. 这两个边界的不谋而合决非偶然, 因为 K- 机制的启动和超声对流都是源自相同的原因. 顺带指出, 出于相同的原因, 此线也近似是恒星色球活动的蓝边界.

与黄的巨星和超巨星相比, 在红的巨星和超巨星大气中, 对流传能效率要高得多, 对流区也更为延伸. 可以肯定, 对流对他们的结构、演化和脉动的影响将更为重要.

从图 1(b) 可见, 在少数红、黄巨星和超巨星大气中, 仍存在弱的超声速对流, 最大的马赫数大约为 1.2. 但必须指出, 我们的非局部对流理论仍是一种亚声速的对流理论. 它是从流体动力学方程和湍流理论导出的, 同样假定气体的湍流密度和温度的相对起伏远远小于 1. 当湍动对流运动接近或超过声速时, 湍流的粘滞耗散将迅速增大. 所以我们仍然怀疑, 图 1(b) 中的弱超声对流是否真的存在. 但有一点可以肯定, 当考虑到随湍流

速度增大而急剧增大的湍流粘滞耗散时，若超声对流仍然存在的话，也必将是弱超声。

3 小结

本文对恒星大气的超声对流进行了一个更完全的研究，获得了某些改善的结果。新的研究结果支持了我们先前工作的主要结论。局部混合长理论严重高估了恒星大气湍动对流运动速度。黄的巨星和超巨星大气中强的超声对流纯粹是局部混合长理论造成的一种假象。当对流回到其正常的非局部对流处理，绝大多数恒星对流运动都是亚声速的。在少数红、黄巨星和超巨星大气中如若仍存在超声对流的话，必将是非常弱的。关于恒星大气中是否存在超声对流的问题仍待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Böhm-Vitense E. *ZA*, 1958, 46: 108
- [2] Deng L, Xiong D R. *ChJAA*, 2001, 1: 50
- [3] 蔡涛. *天文学报*, 2006, 47: 144
- [4] Cai T. *ChA&A*, 2006, 30: 284
- [5] Xiong D R, Deng L. *IAUS*, 2006, 239: 266
- [6] Xiong D R. *A&A*, 1989, 209: 126
- [7] Hummer D G, Mihalas D. *ApJ*, 1988, 331: 794
- [8] Mihalas D, Däppen W, Hummer D G. *ApJ*, 1988, 331: 815
- [9] Däppen W, Mihalas D, Hummer D G, et al. *ApJ*, 1988, 332: 261
- [10] Rogers F J, Iglesias C A. *ApJS*, 1992, 79: 507
- [11] Alexander D R, Ferguson J W. *ApJ*, 1994, 437: 879
- [12] Xiong D R, Deng L. *MNRAS*, 2001, 327: 1137

A Note on Supersonic Convection in Stellar Atmosphere

XIONG Da-run¹ DENG Li-cai²

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

ABSTRACT Using a non-local convection theory, both of the local and non-local convective envelope models of evolutionary series of stars with masses from 1 to 30 solar masses are calculated. The problem of supersonic convection is reviewed. The results show that convective velocities in the stellar atmosphere are seriously overestimated by the local mixing-length theory. Convection is strong supersonic in the atmosphere of yellow giants and super-giants in the local mixing-length theory. They, however, become subsonic for the most stars when convection is return to the normal non-local treatment. Convective velocities increase with the increases of the luminosities of stars. There are still weak supersonic convection in few red and yellow giants and super-giants. It is suspected whether this supersonic convection in the stellar atmosphere is true.

Key words convection, stars: atmospheres