

文章编号:2095-6134(2016)06-0736-05

基于 LAMOST 对银河系厚盘恒星轨道偏心率及厚盘形成机制的研究^{*}

景英杰, 杜翠花[†]

(中国科学院大学物理科学学院, 北京 101408)
(2016 年 3 月 15 日收稿; 2016 年 4 月 13 日收修改稿)

Jing Y J, Du C H. Stellar orbital eccentricity and formation of thick disk of the Galaxy based on LAMOST[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(6):736-740.

摘 要 基于 LAMOST 光谱数据,选取一个太阳邻域 F/G 型主序星样本研究银河系厚盘恒星的轨道偏心率分布. 厚盘星是基于空间位置和金属丰度 $[Fe/H]$ 来证认,同时分析薄盘星的污染带来的影响. 发现厚盘恒星轨道偏心率分布在低偏心率(约为 0.2)处有一个峰值,而且向高偏心率延伸一个尾巴(到 $e \sim 0.8$). 把得到的厚盘恒星偏心率分布与 4 个厚盘形成模型进行对比,发现此结果与富气体并合模型最为符合.

关键词 厚盘形成; 偏心率; 太阳邻域

中图分类号:P156.5 文献标志码:A doi:10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2016. 06. 003

Stellar orbital eccentricity and formation of thick disk of the Galaxy based on LAMOST

JING Yingjie, DU Cuihua

(School of Physics Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract Based on LAMOST data, we use F/G main-sequence star sample to study the orbital eccentricity distribution of the thick-disk stars in the Galaxy. The thick-disk stars are identified by spatial position and metallicity, and the contamination from the thin-disk stars is considered. We find that the observed thick-disk stellar orbital eccentricity distribution has a peak at low eccentricity (~ 0.2) and it extends to high eccentricity ($e \sim 0.8$). We compare our results with the four thick-disk formation models, and our results are in the best agreement with the gas-rich merger model.

Key words thick-disk formation; eccentricity; solar neighborhood

自从 Gilmore 和 Reid^[1] 通过恒星计数方法对银盘恒星数密度的研究引入厚盘以来,越来越多的研究表明厚盘在很多方面有着与薄盘不同的特性. 例如:厚盘的标高约为 1 kpc,而薄盘约为

^{*} 国家自然科学基金委员会 - 中国科学院天文联合基金(U1231113)和中国科学院大学院所合作基金资助
[†] 通信作者, E-mail: ducuihua@ucas.ac.cn

0.3 kpc;厚盘的平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.6$ dex,而薄盘有着偏富的金属丰度,平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.2$ dex;厚盘有着比薄盘小的旋转速度和较大的速度弥散。

尽管厚盘的提出至今已经有 30 多年了,但是对于厚盘的形成和演化依然没有一个一致的解释。目前厚盘的形成模型主要有吸积模型 (accretion model)^[2]、加热模型 (heating model)^[3]、富气体并合模型 (gas-rich merger model)^[4-5]、径向迁移模型 (radial migration model)^[6] 等。吸积模型假设厚盘主要是通过吸积瓦解的卫星星系形成的,Abadi 等^[2]模拟显示有超过 70 的厚盘星是这样形成的。加热模型认为厚盘星主要来自在卫星星系并合过程中被动力学加热的前薄盘星 (pre-existing thin disk)。富气体并合模型采用的假设是厚盘形成于银河系早期气体并合的混乱时代,这里厚盘星主要是在“本地”形成,与吸积模型是很不一样的。径向迁移模型认为薄盘中的星与旋臂发生共振会向外或向内迁移,由于恒星的速度弥散及所处位置与银盘的面亮度相关,从内部向外迁移的恒星会造成银盘加厚。

Sales 等^[7]提出太阳邻域厚盘星的轨道偏心率分布可以用来限制银河系厚盘的演化模型,一些研究已经用类似方法基于一些巡天数据来研究厚盘的起源。例如:Wilson 等^[8]基于 RAVE (Radial Velocity Experiment) 的数据, Lee 等^[9]基于 SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration) 的数据。

在本文中我们用 LAMOST 数据来研究太阳邻域厚盘的偏心率分布并与以上 4 种模型的数值模拟结果进行对比。

1 数据

1.1 观测数据

郭守敬望远镜 (LAMOST, 大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜) 位于中国科学院国家天文台兴隆观测站,是一架有效口径约 4 m,视场约 5° 的“王-苏反射施密特望远镜”。LAMOST 有 4 000 根光纤,可以同时获得 4 000 个天体的光谱,因此具有很高的光谱获取率。巡天的第 2 批数据已经释放,其中恒星光谱有 3 784 461 条,包含有计算出的恒星大气参数以及视向速度 (line-of-sight velocity)。包括恒星光谱型、金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、表

面重力 $\log g$ 在内的大气参数是通过 Ulyss 计算^[10],而视向速度是交叉匹配恒星光谱和 Elodie 模版^[11]得出的。

我们采用 LAMOST 第 2 批释放数据中的恒星大气参数和视向速度,并基于位置与 SDSS 测光数据进行匹配以获得恒星的视星等,恒星的自行则是来自 SDSS-POSS 自行星表^[12-13]。接下来,选取一个 F/G 型的主序星样本,光谱型来自 LAMOST, $\log g$ 大于 3.5 判定为主序星,并限制样本星光谱 g 波段的信噪比 S/N 大于 15。为了用分光视差法求距离,限制色指数 $0.2 < g - i < 4.0$,样本星数量达到 180 759。

Tian 等^[14]报告 LAMOST 得出的视向速度与 APOGEE 有一个 $-5.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的系统偏差。我们对比了 LAMOST 与 SDSS-SSPP 得出的视向速度,同样基于位置匹配了 LAMOST 第 2 批数据 (g 波段信噪比 $S/N > 20$, $\log g > 3.5$) 和 SDSS-SSPP (平均信噪比 $S/N > 20$) 得到了 3 077 颗恒星数据,并将结果画在图 1 中,图中显示 LAMOST 得出的视向速度与 SDSS-SSPP 的差值集中在 $-6.76 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,弥散为 $7.9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这个系统偏差的原因尚不清楚,在本文中,为了与其他巡天数据相符,我们在 LAMOST 的视向速度数据上加上 $6.76 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

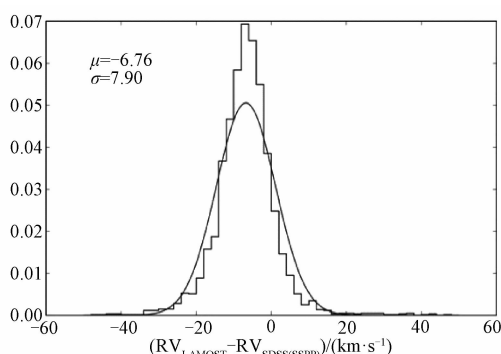


图 1 LAMOST 和 SDSS-SSPP 的视向速度偏移

Fig. 1 Discrepancies in the radial velocities between the LAMOST pipeline and the SDSS-SSPP

1.2 样本星的空间速度和轨道偏心率的计算

我们采用分光视差法来计算恒星的距离,即利用 Ivezić^[15] r 波段绝对星等与色指数 $g - i$ 以及 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的函数关系求得 r 波段绝对星等,再与 r 波段视星等结合并考虑消光得到恒星的距离。通过恒星的距离,自行和视向速度,计算出恒星相对于太阳的 U, V, W 空间速度分量。采用太阳相对于

局域静止坐标系(local standard rest, LSR) 的速度 $(U, V, W) = (-11.1, -12.24, 7.25) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[16], 转换恒星的速度到相对于 LSR 的速度. 采用 $V_{\text{LSR}} = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和太阳距银心距离 $R_{\odot} = 8 \text{ kpc}$ 得出恒星以银心为中心的柱坐标系中的速度分量,同时求得恒星的垂直距离 Z 和距离银心的水平距离 R . 为了得到太阳邻域的样本,我们限制 $6.5 < R < 9.5 \text{ kpc}$, $0 < |Z| < 3 \text{ kpc}$, 这样最终的样本数量为 131 353. 图 2 显示的是样本星在以银心为原点的柱坐标系 $Z-R$ 面的空间分布,图中虚线($Z=0$)代表银河系盘面.

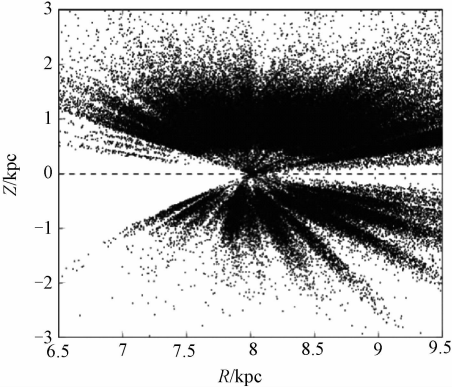


图 2 131 353 颗样本星在 $Z-R$ 面的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution in the $Z-R$ plane of the 131 353 sample stars

下面计算恒星的轨道偏心率,我们采用的银河系的引力势来自 Paczynski^[17], 包括核球、银盘和球状晕. 恒星轨道偏心率定义为 $e = (r_{\text{apo}} - r_{\text{peri}}) / (r_{\text{apo}} + r_{\text{peri}})$, 其中 r_{apo} 代表恒星运行到距银心最远的距离,而 r_{peri} 则是恒星运行到距银心最近的距离,我们把恒星现在的位置和速度作为初始条件来计算偏心率. 图 3 显示的是样本星的偏心率 e 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的对比分布图,图中显示样本星的金属丰度范围主要在 $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.5$, 大部分样本星的偏心率 $e < 0.6$.

2 厚盘恒星轨道偏心率的分布

薄盘、厚盘和晕在空间分布和金属丰度上并没有明确的界限,而是有相互重叠的地方. 为了排除晕星的污染,剔除金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ 的样本星,并且限制旋转速度 $V_{\phi} > 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (Carollo 等^[18] 显示厚盘星平均旋转速度约在 $180 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 弥散为 $51 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而晕平均旋转速度在 0 附近;类似 Wilson 等^[8] 限制 $V > 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). 为研究薄盘的

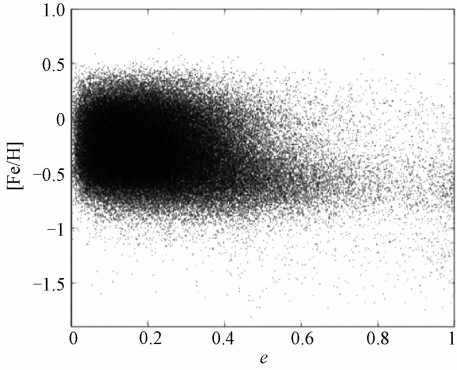


图 3 样本星的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和偏心率 e 分布图
Fig. 3 Metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ vs. orbital eccentricity for the sample stars

影响,我们计算了在不同的金属丰度范围和不同垂直距离 $|Z|$ 的恒星的偏心率分布情况,结果展示在图 4 中. 图 4 横坐标表示偏心率 e ,纵坐标表示在对应偏心率范围内样本星数量所占比率. 图 4 的 3 个子图分别代表恒星金属丰度在 $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.6$, $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.4$ 和 $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.1$ 之间,而图中的点线、点横线和实线分别代表恒星垂直距离在 $0.1 < |Z| < 1.0 \text{ kpc}$, $1.0 < |Z| < 1.5 \text{ kpc}$ 和 $1.5 < |Z| < 3.0 \text{ kpc}$ 之间. 厚盘标高约为 1 kpc , 而薄盘只有约 0.3 kpc , 因此随着 $|Z|$ 的增多,薄盘星所占比率减小,在 $1.5 < |Z| < 3.0 \text{ kpc}$ 厚盘占主导,图 3 显示随着 $|Z|$ 增大,偏心率小于 0.1 的恒星比率减小,大于 0.3 比率略有增加;整体来看恒星所占比率峰值在 $e = 0.1$ 到 $e = 0.3$ 之间,大于 0.3 的所占比率随偏心率增大而减小,而且没有起伏. 金属丰度 $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.6$ 范围内厚盘占主导,薄盘星金属丰度相对偏富^[9], 因此图 4 (a) 厚盘星占主导 (尤其在 $1.5 < |Z| < 3.0 \text{ kpc}$ 范围内), 偏心率分布峰值在 $e \sim 0.2$, 而图 4 (b) 和图 4 (c) 受薄盘影响逐渐增大,虽然偏心率小于 0.2 数量有所增加,但峰值以及向高偏心率延伸出一个尾巴 (到 $e \sim 0.8$) 的趋势没有改变. 计算出的偏心率受所选引力势的影响,因此我们对比了采用其他引力势模型 (Xue 等^[19]) 得出的偏心率,结果显示偏心率的分布没有明显的不同. 综上,我们认为厚盘星的偏心率分布峰值约在 0.2, 大于 0.2 的恒星数量随偏心率增大而逐渐减小,没有起伏变化.

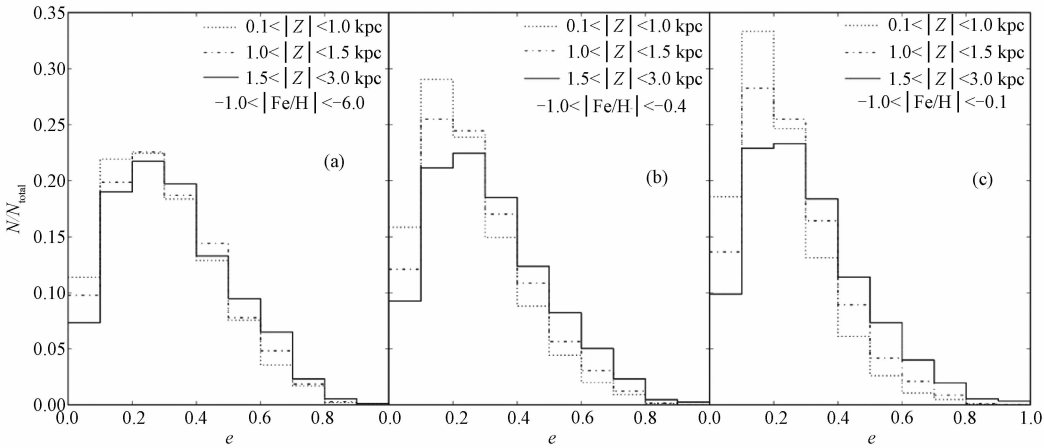


图 4 在不同金属丰度和 $|Z|$ 区间的恒星偏心率归一化分布图

Fig. 4 Normalized distributions of eccentricities at different metallicities and within different $|Z|$ ranges

3 与不同模型的模拟结果比较

我们把得到的偏心率分布与数值模拟的结果进行对比. 之前已有不少对厚盘星轨道偏心率分布的研究, 例如 Wilson 等^[8], Lee 等^[9], 分别利用不同的数据和采用不同的引力势模型都得出一致的结果, 即厚盘星的偏心率分布峰值在低偏心率处, 向高偏心率处逐渐减少, 缺乏高偏心率的星, 在与模拟结果对比后都认为与吸积过程不符合.

图 5 取自 Sales 等^[7], 表示不同厚盘形成模型模拟得出的厚盘星偏心率分布. 图中顺时针从左上开始所采用的数值模拟分别来自 Abadi 等^[2] (吸积模型), Villalobos 和 Helmi^[3] (加热模型), Brook 等^[4-5] (富气体并合模型) 和 Roskar 等^[6] (径向迁移模型).

我们得到的厚盘星偏心率分布峰值出现在较小的偏心率处 (约为 0.2), 吸积模型与此不符合, 其分布峰值偏大 (约为 0.5). 加热模型虽然在约 0.2 处有一个峰值, 但是在约 0.9 处又有一个小的峰值, 而且 $e > 0.8$ 的恒星占有不少的比率, 这与我们得到的分布不符合, 我们的分布缺乏 $e > 0.8$ 的恒星, 而且没有第 2 个峰值. 不过加热模型的第 2 个峰值主要由吸积引起, 而吸积过程与模型中卫星星系的初始条件相关, 如果这个位置出现在偏左位置 (例如 $e = 0.5$), 这个峰值可能就表现不出来. 相比之下径向迁移和富气体并和模型较为符合我们得到的偏心率分布, 尤其富气体模型分布的不对称性更与我们得到的相符合, 而径向迁移模型的分布则相对比较对称 (符合高斯

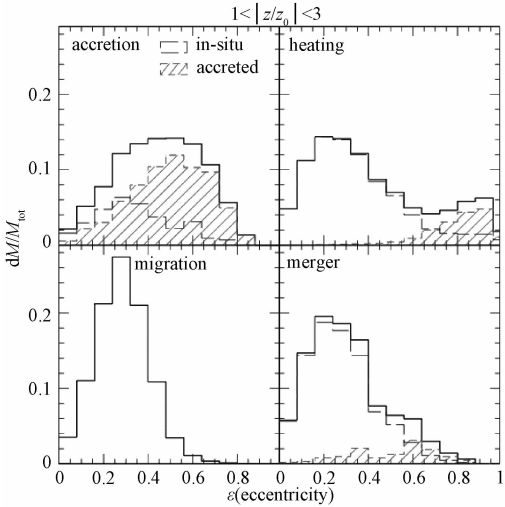


图 5 4 个厚盘形成模型的偏心率分布图

Fig. 5 Eccentricity distributions of the four thick-disk formation models

分布).

厚盘的形成很可能不是一个单一的过程, 从上面的结果看厚盘可能主要由富气体并合时期形成, 即主要在“本地”形成, 而且也有可能受到了径向迁移的影响. 当然这里只是比较了太阳邻域厚盘恒星的轨道偏心率分布, 其他位置 (比如反银心方向) 仍需继续研究.

值得注意的是图 5 中 Z 的范围对应的是 1 到 3 倍的厚盘标高, 从第 3 节来看不同 Z 范围对低偏心率数量稍微有影响, 并不影响偏心率的整体分布 (峰值约在 0.2, 大于 0.2 的数量随偏心率增大而逐渐减小), 因此并不影响我们得出的结论.

4 总结

在本文中,我们基于 LAMOST 释放的数据,计算并得到了太阳邻域内($6.5 < R < 9.5$ kpc, $0 < |Z| < 3$ kpc)F/G 型主序星的偏心率. 为了得到厚盘偏心率分布,我们设法排除晕星以及薄盘星的影响,最后发现厚盘偏心率的分布在较小偏心率(约 0.2)位置处有一个较窄的峰值,向大偏心率端延伸一个尾巴,并且缺乏 $e > 0.8$ 的恒星,最后与 4 个厚盘演化模型的数值模拟结果进行对比,发现与吸积模型和加热模型不符合,与富气体并合模型最为相符,与径向迁移模型有较小出入,我们认为厚盘很可能主要由富气体并合时期形成(在“本地”形成),而且有可能受到了径向迁移的影响. 当然我们在研究厚盘分布时,并不能完全排除晕星和薄盘星的影响,得出的结果还需要更多其他的数据进行检验. 而且要彻底了解厚盘的形成机制,还需要研究恒星的其他分布特点,比如其他金属丰度的分布以及运动学的特点.

参考文献

- [1] Gilmore G, Reid N. New light on faint stars. III - Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc [J]. MNRAS, 1983, 202:1 025 - 1 047.
- [2] Abadi M G, Navarro J F, Steinmetz M, et al. Simulations of galaxy formation in a Λ cold dark matter universe. II. The fine structure of simulated galactic disks [J]. ApJ, 2003, 597(1):21 - 34.
- [3] Villalobos A, Helmi A. Simulations of minor mergers - I. General properties of thick discs [J]. MNRAS, 2008, 391(4):1 806 - 1 827.
- [4] Brook C B, Kawata D, Gibson B K, et al. The emergence of the thick disk in a cold dark matter universe [J]. ApJ, 2004, 612(2):894 - 899.
- [5] Brook C B, Gibson B K, Martel H, et al. The emergence of the thick disk in a CDM universe. II. Colors and abundance patterns[J]. ApJ, 2005, 630(1):298 - 308.
- [6] Roskar R, Debattista V P, Quinn T R, et al. Riding the Spiral Waves: Implications of stellar migration for the properties of galactic disks[J]. ApJ, 2008, 684(2):179 - 182.
- [7] Sales L V, Helmi A, Abadi M G, et al. Orbital eccentricity as a probe of thick disc formation scenarios [J]. MNRAS, 2009, 400(1):L61 - L65.
- [8] Wilson M, Helmi A, Morrison H L, et al. Testing formation mechanisms of the Milky Way's thick disc with RAVE [J]. MNRAS, 2011, 413(3):2 235 - 2 241.
- [9] Lee Y S, Beers T C, An D, et al. Formation and evolution of the disk system of the Milky Way: [alpha/Fe] ratios and kinematics of the SEGUE G-dwarf sample [J]. ApJ, 2011, 738(2):187 - 203.
- [10] Wu Y, Luo A L, Li H N, et al. Automatic determination of stellar atmospheric parameters and construction of stellar spectral templates of the Guoshoujing Telescope (LAMOST) [J]. RAA, 2011, 11(8):924 - 946.
- [11] Moutaka J, Illovaisky S A, Prugniel P, et al. The ELODIE archive [J]. PASP, 2004, 116(821):693 - 698.
- [12] Munn J A, Monet D G, Levine S E, et al. An improved proper-motion catalog combining USNO-B and the sloan digital sky survey [J]. AJ, 2004, 127(5):3 034 - 3 042.
- [13] Munn J A, Monet D G, Levine S E, et al. Erratum: "an improved proper-motion catalog combining Usno-B and the Sloan digital sky survey" (2004, AJ, 127, 3034) [J]. AJ, 2008, 136(2):895 - 895.
- [14] Tian H J, Liu C, Carlin J L, et al. The stellar kinematics in the solar neighborhood from LAMOST data [J]. ApJ, 809(2):145 - 161.
- [15] Ivezić Ž, Sesar B, Jurić M, et al. The Milky May tomography with SDSS II stellar metallicity[J]. ApJ, 2008, 684(1):287 - 325.
- [16] Schonrich R, Binney J, Dehnen W. Local kinematics and the local standard of rest [J]. MNRAS, 2010, 403(4):1 829 - 1 833.
- [17] Paczynski B. A test of the galactic origin of gamma-ray bursts [J]. ApJ, 1990, 348:485 - 494.
- [18] Carollo D, Beers T C, Chiba M, et al. Structure and kinematics of the stellar halos and thick disks of the Milky Way based on calibration stars from sloan digital sky survey DR7[J]. ApJ, 2010, 712(1):692 - 727.
- [19] Xue X X, Rix H W, Zhao G, et al. The Milky Way's circular velocity curve to 60 kpc and an estimate of the dark matter Halo mass from the kinematics of ~2400 SDSS blue horizontal-branch stars [J]. ApJ, 2008, 684(2):1 143 - 1 558.