

GD-1星流金属丰度与运动特性分析*

吴兴华¹ 石维彬^{2†} 陈天翔² 张哲² 宋汉峰^{1,3}

(1 贵州大学物理学院 贵阳 550025)

(2 山东大学(威海)空间科学与物理学院 威海 264209)

(3 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘要 星流在星系形成与演化过程中扮演了重要的角色,对银河系中星流的研究将有助于进一步探究银河系的合并历史.将LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) DR6光谱数据以及SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR12光谱数据分别与Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) DR2天体测量数据交叉匹配,获得恒星自行等数据.对GD-1星流在速度空间、几何空间和金属丰度上进行限制,从LAMOST DR6和SDSS DR12数据中共获得了157颗星流成员星. GD-1星流的平均金属丰度为 $[Fe/H] = -2.16 \pm 0.10$ dex,延伸长度超过 80° .收集前人给出的GD-1星流高概率成员星,组成较大的成员星样本进行对比分析,发现GD-1星流的金属丰度分布呈现内低外高的特点,沿着星流方向径向速度分布特点是两端大、中间小, $\phi_1 = -20^\circ$ (ϕ_1 为GD-1星流坐标系横坐标)和 $\phi_1 = -60^\circ$ 附近的间隙是因为成员星运动差异形成的.根据成员星分布及其速度分布特性,推测GD-1星流起源位置是在 $\phi_1 = -40^\circ$ 附近.

关键词 星流: 运动, 星流: 恒星金属丰度, 球状星团: 瓦解, 观测数据: 郭守敬望远镜
中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

星流是球状星团或矮星系被银河系的潮汐力撕碎、瓦解而留在银河系中形成的条状恒星集团^[1].目前关于银河系的形成有两个模型:一是整体塌缩模型,二是吸积并合模型.随着近些年对银河系形成更深入的研究,人们逐渐接受吸积并合的银河系形成模型,在小星系形成之后,大星系通过吸积或者并合小星系而形成^[2-3].GD-1星流是利用斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)在2006年发现的长 63° 、宽仅有 0.5° 的贫金属星流,星流位于银盘上方大约8.5 kpc处,可能来源于一个球状星团^[4].Willett等^[5]在2009年拟合了GD-1星流轨道,轨道偏心率 $e = 0.33$,近银心点为14.4 kpc,

2020-06-23收到原稿, 2020-10-14收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1631105、U1831107、11863003、11463002),山东省自然科学基金项目(ZR2018MA031),贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5781号)资助

[†]swb@sdu.edu.cn

远银心点为28.7 kpc, 并且轨道倾角约为 35° , 星流金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.1 \pm 0.1$ dex. 2010年, Koposov等^[6]使用等时线和测光数据拟合的方法发现GD-1星流平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.4$ dex, 年龄为9 Gyr, 并建立了GD-1星流坐标系. GD-1星流空间分布并不是连续的, Price-Whelan和Bonaca在2018年利用Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) DR2数据和Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)测光数据绘制了GD-1星流图, 发现了两个间隙和一个尖刺结构, 间隙分别位于 $\phi_1 \sim -40^\circ$ 和 $\phi_1 \sim -20^\circ$ ^[7](ϕ_1 、 ϕ_2 分别为GD-1星流坐标系横纵坐标).

GD-1星流是迄今为止发现的最长最冷的星流之一, 也是用来限制银河系暗物质特性和银河系引力势的最佳星流之一^[8]. 但是已确定的星流成员星样本较少, 成为制约研究的主要因素. Huang等人在2019年通过SDSS测光数据, SDSS/SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration)和LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope)光谱数据以及Gaia DR2数据, 筛选得到了67颗高概率成员星, 测得星流平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.96$ dex, 并且证实了Price-Whelan和Bonaca提出的位于 $\phi_1 \sim -40^\circ$ 附近的间隙结构^[9]. Li等人结合Gaia DR2、SDSS DR14以及LAMOST DR6数据发现GD-1星流的年龄约为13 Gyr, 平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.2 \pm 0.12$ dex, 距离太阳的距离约为8 kpc, 并且认为星流起源的可能位置是在 $(\alpha, \delta) \sim (178.18^\circ, 52.19^\circ)$ ^[10], α 、 δ 分别为天球赤道坐标系的赤经和赤纬. Bonaca等人在2020年利用高分辨率光谱MMT (Multiple-Mirror Telescope)/Hectochelle得出GD-1星流主体和尖刺部分在运动学和化学性质上一致, 星流主体和尖刺的速度弥散 $\lesssim 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2.3$ dex, 表明GD-1星流来自于一个球状星团^[11].

2 GD-1星流成员星筛选

GD-1星流成员星的限制分为几何空间限制、速度空间限制以及金属丰度限制. LAMOST DR6和SDSS DR12是两个不同巡天的数据, 光谱数据的参数存在一定系统差. Huang等人2019年用LAMOST和SDSS同源的20000多颗恒星做了 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和视向速度的比较, 发现LAMOST光谱数据的恒星平均金属丰度比SDSS光谱数据高0.06 dex, 两者的视向速度没有明显的系统差^[9]. 我们采用Huang等人的结论校准LAMOST DR6和SDSS DR12数据之间的系统差. LAMOST DR6和SDSS DR12光谱数据交叉匹配Gaia DR2数据得到恒星的自行和视差数据时, 赤经赤纬的匹配精度设定为 $0.3''$.

2.1 几何空间

当矮星系或者球状星团被银河系瓦解之后, 一般最先消失的是空间聚集的特征, 但是某一区域恒星密度过高是较容易观测的, 特别一些年轻的星流还保持空间聚集的几何特征^[12]. Willett等人用一个3阶多项式:

$$\delta = -864.5161 + 13.22518\alpha - 0.06325544\alpha^2 + 0.0001009792\alpha^3, \quad (1)$$

拟合了GD-1星流在天空中的踪迹, 在 $120^\circ < \alpha < 130^\circ$ 和 $175^\circ < \alpha < 220^\circ$ 内, 宽度取 1° , 在 $130^\circ < \alpha < 175^\circ$ 内, 宽度取 0.6° ^[5]. Li等人利用Gaia DR2数据在 ϕ_1 - ϕ_2 平面内拟合

了GD-1星流轨迹, 轨迹的2阶多项式为:

$$\phi_2 = -1.057 - 7.030 \times 10^{-2} \phi_1 - 1.033 \times 10^{-3} \phi_1^2, \quad (2)$$

宽度为 1° ^[10]. 对比Li等^[10]、Huang等^[9]以及Malhan等^[13]认为的GD-1星流在 ϕ_1 - ϕ_2 平面的轨迹(这里只考虑轨迹中心)如图1, 从图1中可以看到在 $-60^\circ < \phi_1 < -20^\circ$ 区间内, 3条轨迹几乎相同. 在 $\phi_1 < -60^\circ$ 区间, Li等^[10]的轨迹线介于其他两者之间. 综合以上分析, 在几何空间, 用(2)式限制GD-1星流的踪迹. 因GD-1星流是个细长的结构, 宽度设定为 1° . 经过几何空间的筛选, 从LAMOST DR6数据获得了110592颗候选体, 从SDSS DR12数据获得了8085颗候选体.

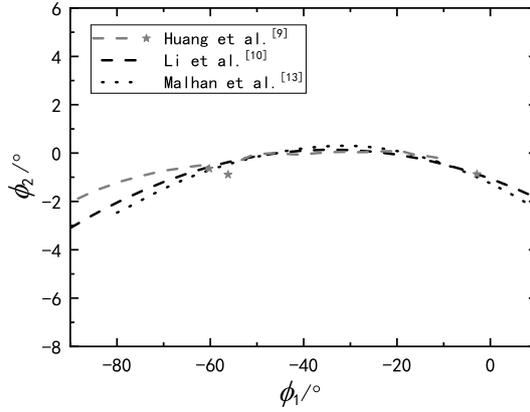


图1 GD-1星流在 ϕ_1 - ϕ_2 平面内的轨迹, 分别来自Huang等^[9]、Li等^[10]以及Malhan等^[13]

Fig. 1 Trace of GD-1 star streaming in ϕ_1 - ϕ_2 plane, respectively from Huang et al.^[9], Li et al.^[10] and Malhan et al.^[13]

2.2 速度空间

星流的几何空间特征会在较短的时间内消失, 变得难以辨认, 但是在之后的很长时间内星流的速度空间特征仍旧存在^[14-17]. 对Huang等人筛选得到的67颗^[9]以及Willett等人筛选的48颗^[5]GD-1星流高概率成员星在 l - v_{gsr} 平面内进行拟合, 得到星流的速度轨迹, 其中 l 为银道坐标系的经向坐标即银经, v_{gsr} 为标准静止银河系下恒星的径向速度. Li等人通过对SDSS DR14数据以及LAMOST DR6数据进行限制, 从SDSS DR14数据获得了116颗成员星的136个光谱, 从LAMOST DR6数据获得了20颗成员星的32个光谱^[10]. 考虑到一颗恒星有多个光谱时在同一坐标就有多个速度与之对应, 可能会对星流成员星的筛选造成影响, 因此在速度拟合时没有参考Li等人的成员星数据. 速度拟合如图2所示, 拟合多项式为:

$$v_{\text{gsr}} = -1034.1664 + 20.90324l - 0.1804l^2 + 6.73454 \times 10^{-4}l^3 - 8.19036 \times 10^{-7}l^4, \quad (3)$$

v_{gsr} 与径向速度RV之间的关系为^[18]:

$$RV = v_{\text{gsr}} - (9.0 \cos b \cos l + 232.0 \cos b \sin l + 7.0 \sin b), \quad (4)$$

其中 b 为银纬,是银道坐标系的纬向坐标. 筛选宽度设置为 $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 经过 l - v_{gsr} 筛选, LAMOST DR6数据剩余了15444颗候选体, SDSS DR12剩余了1662颗候选体.

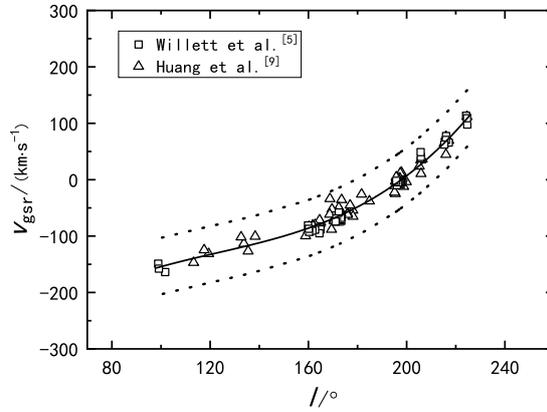


图 2 三角形为Huang等^[9]筛选的成员星, 方框为Willett等^[5]筛选的成员星. 中间黑线为拟合曲线, 两条黑色划线为上下边界.

Fig. 2 The triangles are the member stars selected by Huang et al.^[9], and the boxes are the member stars selected by Willett et al.^[5]. The middle black line is the fitting curve, and the two black lines are the upper and lower boundaries.

速度空间的第2步筛选是对恒星自行的限制, 天体在宇宙空间的运动可以分为切向运动和视向运动, 自行是天体空间运动的切向角速度^[19]. 对自行分别在 ϕ_1 - μ_α^* 、 ϕ_1 - μ_δ (μ_α^* 、 μ_δ 分别为恒星在赤经、赤纬方向的自行)两个平面内进行限制, 参考Li等人提出的限制条件^[10]:

$$\mu_\alpha^* = -7.482 + 6.392 \times 10^{-2} \phi_1 + 4.553 \times 10^{-3} \phi_1^2 + 5.167 \times 10^{-5} \phi_1^3 + 1.950 \times 10^{-7} \phi_1^4, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu_\delta = & -3.698 + 2.450 \times 10^{-1} \phi_1 - 5.795 \times 10^{-3} \phi_1^2 - 2.550 \times \\ & 10^{-4} \phi_1^3 - 2.858 \times 10^{-6} \phi_1^4 - 1.121 \times 10^{-8} \phi_1^5. \end{aligned} \quad (6)$$

两个方向的自行筛选宽度设置均为 $2 \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$, 经过自行筛选, LAMOST DR6数据剩余了249颗候选体, SDSS DR12剩余了160颗候选体.

2.3 金属丰度

GD-1星流已被证实是一个贫金属星流, 为减少银河系背景星对成员星筛选的影响, 金属丰度限制条件设置为 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.5 \text{ dex}$, 与Malhan等人设定的金属丰度限制条件一致^[13]. 经过金属丰度筛选, 从LAMOST DR6数据获得了29颗候选体, 从SDSS DR12获得了129颗候选体.

158颗候选体沿着 ϕ_1 方向的径向速度分布如图3, 可以看到绝大多数候选体形成一个明显的轨迹, 去掉偏离主轨迹较远的一颗候选体, 最终LAMOST DR6数据获得了29颗高概率成员星, SDSS DR12数据获得了128颗高概率成员星.

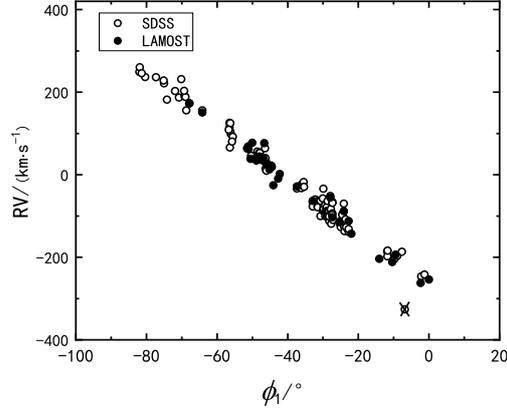


图 3 经过筛选所得的158颗GD-1星流候选体沿着 ϕ_1 的径向速度分布, 去掉一颗偏离主轨迹的候选体, 用叉号表示.

Fig. 3 The distribution of the radial velocity of 158 GD-1 star streaming candidates selected by screening along ϕ_1 , and one candidate that deviated from the main trajectory was removed, denoted by cross.

3 GD-1星流特性

3.1 分布特性

成员星分布如图4下图, 可以看到GD-1星流在空间分布上从 $\phi_1 = -80^\circ$ 延伸到 $\phi_1 = 0^\circ$ 左右, 并且星流不是连续的, 断裂成了4部分. 最右端的部分可能是由于选择效应造成成员星较少, 但是在 $\phi_1 \in [-60^\circ, -40^\circ)$ 和 $\phi_1 \in [-40^\circ, -20^\circ)$ 两个区间内的成员星聚集明显. 如图4上图所示, 在 $\phi_1 = -40^\circ$ 两端有较高的峰值, 证明GD-1星流在 $\phi_1 = -40^\circ$ 附近有一个间隙, 与前人研究结果一致^[7]. 在 $\phi_1 = [-80^\circ, -60^\circ)$ 范围内有成员星聚集, 并且 $\phi_1 = -60^\circ$ 附近断裂明显, 我们推测GD-1星流在 $\phi_1 = -60^\circ$ 处也存在一个间隙.

星流成员星的自行、径向速度以及视差分布如图5所示. 整体来看, SDSS DR12数据的自行和视差弥散较大, LAMOST DR6数据速度弥散较大. 从 ϕ_1 - μ_α^* 分布图中可以看到, 赤经方向的自行在 $\phi_1 = -80^\circ$ 处最小约为 $-2 \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$, 沿着星流自行逐渐增大, 最终在 $\phi_1 = 0^\circ$ 处增大到约 $-9 \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$. 赤纬方向的自行分布特点则是先增大后减小, 在 $\phi_1 = -80^\circ$ 处约为 $-10 \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$, 逐渐增大到 $-14 \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$, 在 $\phi_1 = -50^\circ$ 处自行开始减小, 最小值约为 $-2 \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$. GD-1星流的径向速度大小沿着星流呈线性分布, 从大约 $300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 变化到 $-300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右. 虽然部分成员星视差数据误差较大, 但仍然可以从图5右下图中看到视差主要分布在 0 mas 左右.

大的成员星样本有助于我们深入了解GD-1星流的特性, 为此收集了前人筛选的GD-1星流高概率成员星^[5,9-10], 如图6左图所示, 并在 ϕ_1 - ϕ_2 平面内拟合星流轨迹, 3阶多项式为:

$$\phi_2 = -1.34446 - 0.09469\phi_1 - 0.0016\phi_1^2 - 4.10592 \times 10^{-6}\phi_1^3. \quad (7)$$

通过筛选得到的成员星, 得出GD-1星流的平均 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.16 \pm 0.10 \text{ dex}$. 从图6右图可以发现, LAMOST DR6成员星相比SDSS DR12成员星金属丰度较高, 集中在 $(-2.3 \text{ dex},$

-1.8 dex), 星流整体的金属丰度主要集中在(-2.5 dex, -1.9 dex).

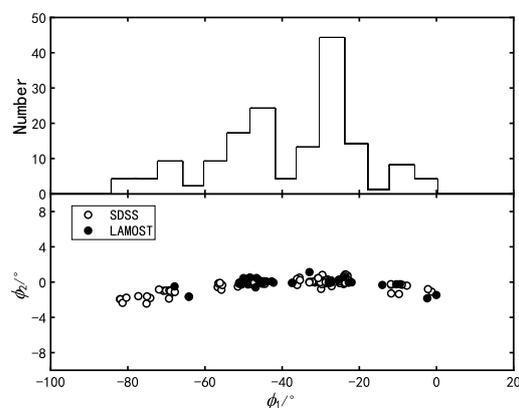


图 4 上图为GD-1星流成员星密度分布图, 下图为成员星空间分布图. 黑色圆圈是筛选自SDSS DR12的成员星, 黑点是筛选自LAMOST DR6的成员星.

Fig. 4 The top panel shows the distribution of member stars density of GD-1 star streaming, and the bottom panel shows the spatial distribution of the member stars. Black circles are member stars filtered from SDSS DR12, and black dots are members filtered from LAMOST DR6.

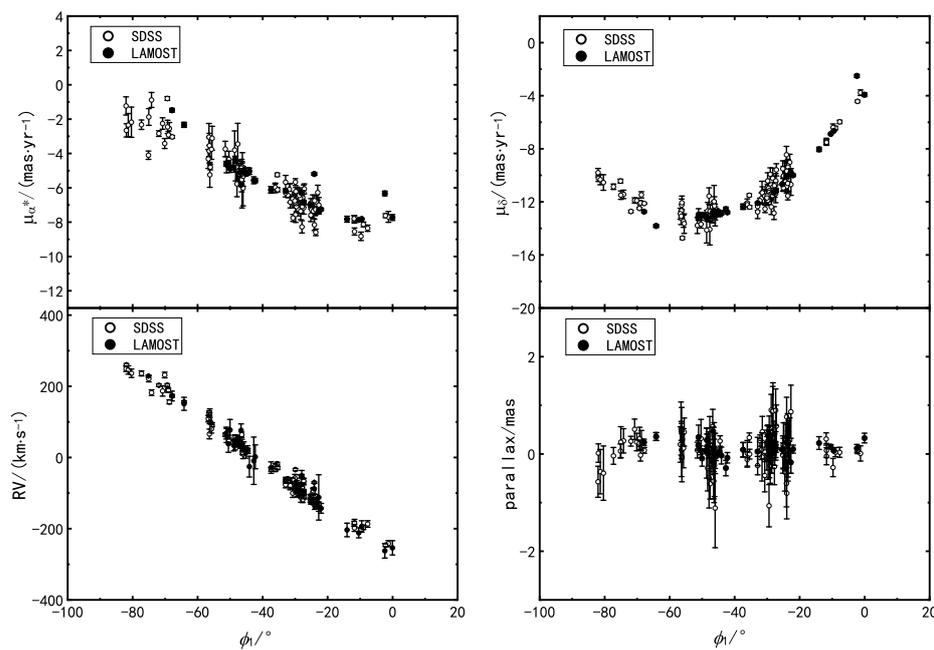


图 5 157颗成员星的自行、径向速度以及视差分布. 黑点为筛选自LAMOST DR6, 黑色圆圈为筛选自SDSS DR12.

Fig. 5 Proper motion, radial velocity and parallax distribution of 157 member stars. The black dots are from LAMOST DR6 and the black circles are from SDSS DR12.

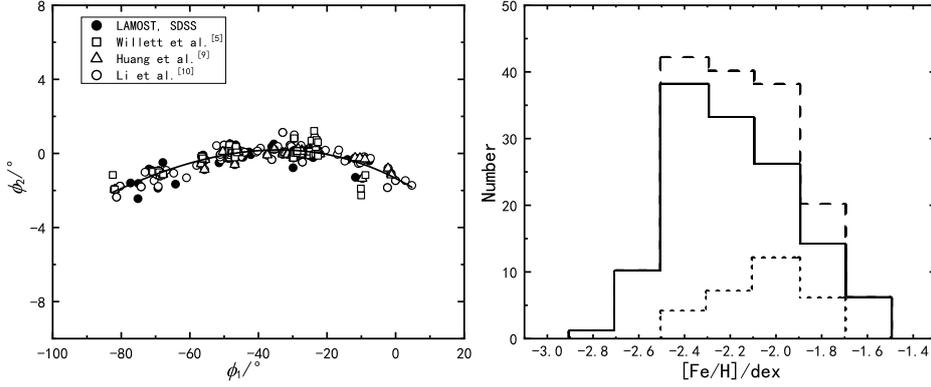


图 6 左图为157颗成员星和前人筛选所得的成员星在 ϕ_1 - ϕ_2 平面内的分布. 右图为157颗成员星的金属丰度分布, 黑色点线为LAMOST DR6成员星, 黑色实线为SDSS DR12成员星.

Fig. 6 The left panel shows the distribution of 157 member stars and the member stars obtained by previous screening in the plane of ϕ_1 - ϕ_2 . The panel on the right shows the metal abundance distribution of 157 member stars, with LAMOST DR6 member stars in dotted line and SDSS DR12 member stars in black solid line.

3.2 金属丰度特性

恒星在演化过程中会产生不同的元素, 根据恒星的金属丰度则可以推断恒星的年龄等特征. GD-1星流推测起源于一个古老的贫金属球状星团^[4], 球状星团在金属丰度以及速度上具有成团性. 前人对于GD-1星流金属丰度的研究更多地集中于平均金属丰度, 金属丰度沿着星流分布的特点并未给出. 如图7 (a)所示, 157颗成员星分布在 ϕ_1 - ϕ_2 平面, 用颜色映射 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的大小. 可以发现大多数金属丰度更低的成员星集中在星流中心, 而金属丰度较高的成员星则更多地分布在边缘位置. 为了探究这种特性是否是GD-1星流固有的特性, 将收集到的成员星^[5,9-10]作为对比样本, 如图7 (b)所示. 尽管图(b)中星流较细, 但从星流整体仍然可以发现金属丰度较低成员星更多集中在星流中心. 球状星团的恒星金属丰度差异不是很大, 在受到银河系潮汐力撕裂、瓦解形成星流时, 星流成员星的金属丰度分布应该是均匀的. 造成GD-1星流内低外高特性的原因可能是金属丰度较高的恒星速度弥散较大, 随着时间推移, 更多地分布在星流外围. 而金属丰度较低的恒星速度弥散较小, 其沿着星流运动的特征维持时间更长.

3.3 运动特性

通过成员星速度分布的特点可以得到GD-1星流的运动信息以及运动趋势. 从图7 (c)、(d)都可以发现, GD-1星流成员星的 v_{gsr} 沿着星流分布有明显的特点, 星流两端速度较大, 并且速度方向相反. 星流左端背离银心的速度较大, 右端朝向银心的速度较大, 右端速度大于左端速度. 星流位于 $\phi_1 \in [-60^\circ, -20^\circ]$ 的部分速度较小, 速度为 $0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的位置大约在 $\phi_1 = -40^\circ$. 星流并不是沿着一个方向在运动, 星流运动从速度图上来看分为了3部分, 左端与右端速度方向相反, 中间部分运动趋势不明显. GD-1星流有两个明显的间隙, 分别位于 $\phi_1 = -40^\circ$ 和 $\phi_1 = -20^\circ$ ^[7], 现在可以推断位于 $\phi_1 = -20^\circ$ 的间隙是由两端速度不同造成的. 同样, $\phi_1 = -60^\circ$ 处的间隙也是速度不同造成的. $\phi_1 = -40^\circ$ 处的间

隙两端速度几乎相同, 速度并不是形成间隙的原因, 而以 $\phi_1 = -40^\circ$ 处间隙为中心, 星流左右两部分 v_{gsr} 方向相反, 速度大小随着向两端扩展逐渐增大. $\phi_1 = -40^\circ$ 处间隙两端星流的运动特征表现出巨大差异, 我们推测 $\phi_1 = -40^\circ$ 处可能是GD-1星流起源的地方. 随着时间推移, 各部分速度方向的不同可能会导致星流的断裂, 空间几何特征将难以捕捉.

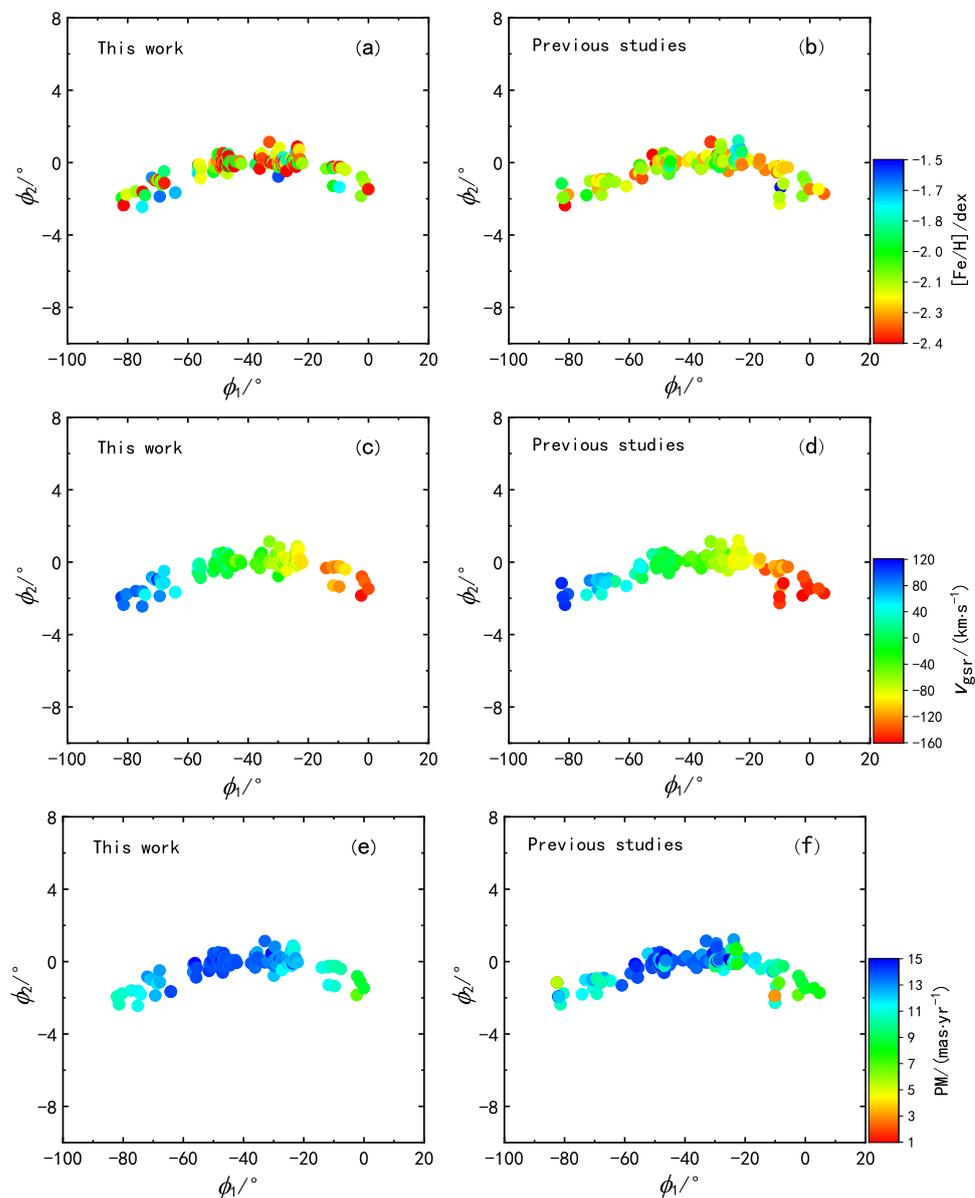


图 7 GD-1星流成员星的金属丰度、速度以及自行分布. 图(a)、(c)和(e)为157颗成员星分布图, 图(b)、(d)和(f)为前人^[5,9-10]筛选所得的成员星.

Fig. 7 Metal abundance, velocity and proper motion of GD-1 star streaming members. Panels (a), (c), and (e) show the distribution of 157 member stars, while panels (b), (d), and (f) show the member stars screened by predecessors^[5,9-10].

自行可以描述恒星在空间中的横向运动, 这里讨论的自行是指恒星总的自行, 总自行 $\mu_{\text{tot}} = \sqrt{(\mu_{\alpha}^*)^2 + (\mu_{\delta})^2}$. 自行沿着星流的分布同样具有明显的特点如图7 (e)和(f)所示, 与速度分布刚好相反的是星流两端的自行较小, 中间部分自行较大, 星流自行最小值的位置刚好对应径向速度的最大值位置. 星流两端成员星的径向速度较大, 朝着银心或者背离银心运动的趋势更明显, 横向运动较小, 所以自行较小. 中间部分径向速度较小, 横向运动较大, 故自行较大.

4 讨论

沿着星流分布存在很多子结构, Price-Whelan等人指出在 $\phi_1 = -30^\circ$ 附近存在一个尖刺结构^[7]. 星流附近子结构的起源目前还没有定论, 可能是属于星流逸散出去的团块, 也可能是球状星团的一部分. 在几何空间筛选成员星时我们设置的宽度是 1° , 为了探究宽度的不同是否会影响成员星的筛选, 将宽度分别设置为 0.9° 和 1.1° , 其他条件不变, 筛选结果如图8所示. 对比图8左右两部分图, 可以发现宽度的变化并没有改变星流的金属丰度、速度以及自行分布特点, 证明成员星筛选方法是合理的. 无论宽度设置为 1° 、 1.1° 或者 0.9° , 我们注意到在 $\phi_1 = -3^\circ$ 附近皆存在一个间隙, 这与de Boer等人发现的间隙位置一致, 可能是暗物质冲击造成的^[8]. 需要注意的是当我们把宽度设置为 1.1° 时, $\phi_1 = -30^\circ$ 处星流上方有个凸起的结构, 如图8右图黑色圆圈所示, 与Price-Whelan等人提出尖刺的位置相同^[7]. 从图8右图可以看到, 尖刺位于 $(\phi_1, \phi_2) \sim (-30^\circ, 1.1^\circ)$ 附近, 偏离星流中心约 1° . 尖刺成员星较少, 平均 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.20 \pm 0.06$ dex. 在速度以及自行图上, 尖刺结构与星流主体分布特征一致, 在金属丰度图中, 尖刺的金属丰度与星流相近, 表明尖刺曾是星流的一部分. 尖刺的长度约为 6° , 产生原因可能是星流受到暗物质冲击而形成的^[7,20].

5 总结与展望

通过几何空间、速度空间和金属丰度对LAMOST DR6数据以及SDSS DR12数据限制, 总共获得了157颗星流成员星. 结合前人筛选的GD-1星流成员星, 发现了星流金属丰度内低外高的分布特点, 星流的 v_{gsr} 分布特点是两端大、中间小, 得出 $\phi_1 = -20^\circ$ 以及 $\phi_1 = -60^\circ$ 处的间隙是因为成员星运动差异形成的. 沿着星流的自行分布与 v_{gsr} 分布刚好相反, 自行分布特点是中间大、两端小, 推测星流的起源处可能是 $\phi_1 = -40^\circ$ 附近, 星流的平均金属丰度为 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.16 \pm 0.10$ dex.

GD-1星流窄长的特点使得星流成员星样本较少, 尤其是包含距离数据的成员星. 在将来的工作中希望能获得包含距离信息的大样本成员星数据, 对GD-1星流的性质以及起源做更深入的探究. 另一方面, 低分辨率光谱数据提供的恒星速度误差较大, 对获得精确的GD-1星流速度弥散等信息有较大影响, 将来我们会利用高分辨率光谱数据探究GD-1星流的运动学信息. GD-1星流窄而冷的特性使它成为研究银河系引力势的最佳样本, 下一步工作中我们将尝试利用GD-1星流分析研究银河系的引力势.

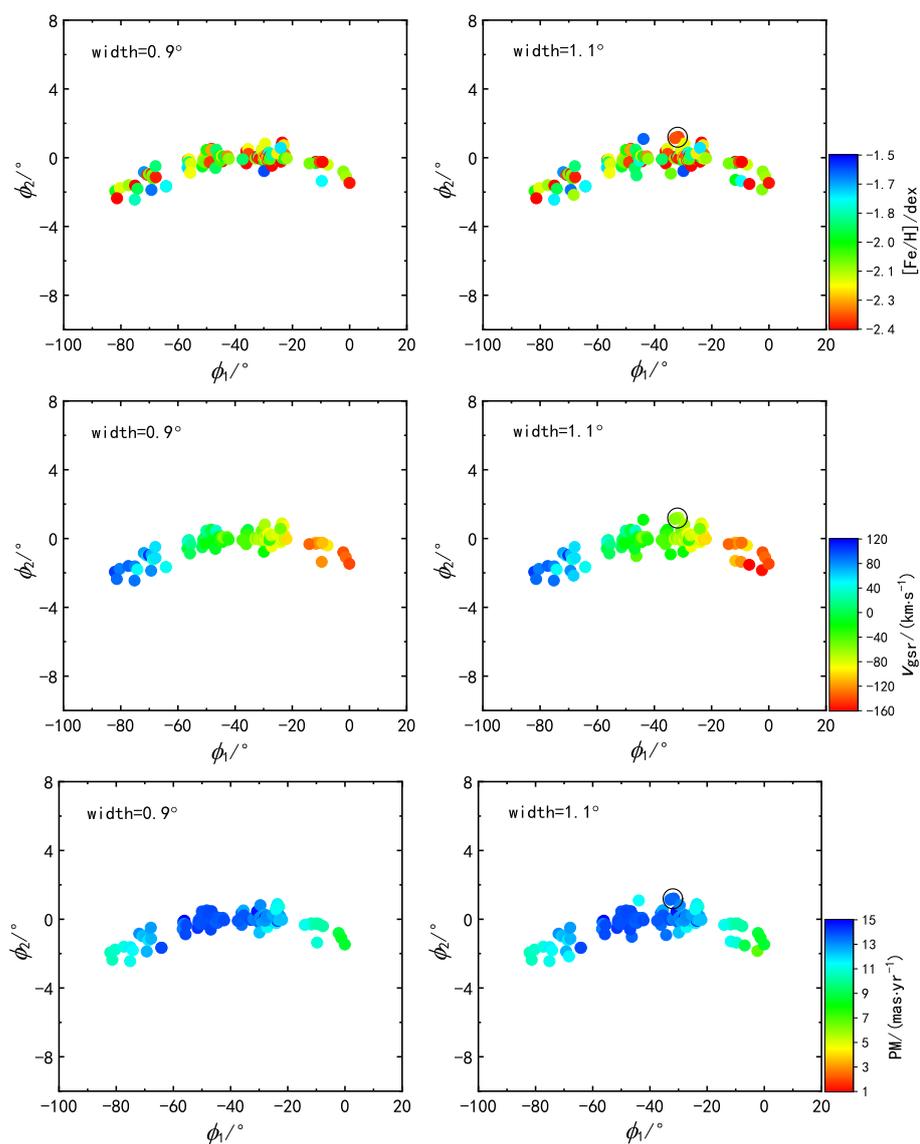


图 8 不同宽度筛选时所得的成员星分布, 左边筛选宽度为 0.9° , 右边筛选宽度为 1.1° , 黑色圆圈内为尖刺结构.

Fig. 8 The member stars distribution obtained by different width filtering. The left width is 0.9° , and the right width is 1.1° , the spur structure is in the black circle.

致谢 感谢审稿人提出的宝贵意见.

参 考 文 献

- [1] Eggen O J. AJ, 1996, 112: 1595
- [2] Benson A J, Bower R G, Frenk C S, et al. ApJ, 2003, 599: 38
- [3] Springel V, Hernquist L. A Multi-Phase Model for Simulations of Galaxy Formation. Astrophysical Supercomputing Using Particle Simulations, IAU Symposium 208, Tokyo, Japan, July 10-13, 2001, 2003

- [4] Grillmair C J, Dionatos O. *ApJ*, 2006, 643: L17
- [5] Willett B A, Newberg H J, Zhang H T, et al. *ApJ*, 2009, 697: 207
- [6] Koposov S E, Rix H W, Hogg D W. *ApJ*, 2010, 712: 260
- [7] Price-Whelan A M, Bonaca A. *ApJ*, 2018, 863: L20
- [8] de Boer T J L, Erkal D, Gieles M. *MNRAS*, 2020, 494: 5315
- [9] Huang Y, Chen B Q, Zhang H W, et al. *ApJ*, 2019, 877: 13
- [10] Li G W, Yanny B, Wu Y. *ApJ*, 2018, 869: 122
- [11] Bonaca A, Conroy C, Hogg D W, et al. *ApJ*, 2020, 892: L37
- [12] 田浩, 姜碧涛. *天文学进展*, 2012, 30: 64
- [13] Malhan K, Ibata R A. *MNRAS*, 2019, 486: 2995
- [14] Helmi A, White S D M. *ASP Conference Series*, 1999, 165: 89
- [15] Tremaine S. *AIP Conference Proceedings*, 1992, 278: 599
- [16] Johnston K V, Zhao H S, Spergel D N, et al. *AAS*, 1998, 193: 8402
- [17] Ibata R A, Lewis G F. *ApJ*, 1998, 500: 575
- [18] Law D R, Majewski S R. *ApJ*, 2010, 714: 229
- [19] 金文敬. *天文学进展*, 2010, 28: 53
- [20] Bonaca A, Hogg D W, Price-Whelan A M, et al. *ApJ*, 2019, 880: 38

Analysis on the Metal Abundance and Motion Property of GD-1 Star Streaming

WU Xing-hua¹ SHI Wei-bin² CHEN Tian-xiang² ZHANG Zhe²
SONG Han-feng^{1,3}

(1 College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025)

(2 School of Space Science and Physics, Shandong University (Weihai), Weihai 264209)

(3 Yunnan Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

ABSTRACT The star streaming plays an important role in the formation and development of galaxies, and the study of star streaming in the Milky Way will help us further explore the origin and evolution of the Milky Way. The spectrum data of LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) DR6 and SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR12 were cross-matched with the astrometric data of Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) DR2, respectively, to obtain the data of proper motion, etc. By limiting the velocity space, geometric space and metal abundance of the GD-1 star streaming, we obtained a total of 157 member stars of the star streaming from LAMOST DR6 and SDSS DR12. The average metal abundance of GD-1 star streaming is $[Fe/H] = -2.16 \pm 0.10$ dex, the elongation of star streaming is about 80° . The high probability member stars of GD-1 star streaming given by predecessors were collected to form larger member samples for comparative analysis. The metal abundance distribution of the GD-1 star streaming is found to be low inside and high outside, the radial velocity distribution along the star streaming is characterized by large velocities at both ends and small velocities in the middle. The gap between $\phi_1 = -20^\circ$ (ϕ_1 is the horizontal coordinate of the GD-1 star streaming coordinate system) and $\phi_1 = -60^\circ$ is due to the movement differences of member stars. According to the distribution of member stars and their velocity distribution property, it is speculated that the origin position of GD-1 star streaming is near $\phi_1 = -40^\circ$.

Key words star streaming: motion, star streaming: stellar metallicity, globular cluster: disruption, observational data: LAMOST