论文

搜寻球状星团 M22 中的高速星

高新华*

常州大学信息科学与工程学院, 常州 213164

*联系人, E-mail: xhgcczu@163.com

收稿日期: 2014-09-05; 接受日期: 2014-09-24; 网络出版日期: 2015-01-19

国家自然科学基金(批准号: 11403004)和常州大学校基金(编号: ZMF1002121)资助项目

摘要 高速星是研究球状星团内部恒星动力学过程的重要工具, 但目前为止已发现的高速星数量很少, 本研究利用高精度自行和测光数据尝试在球状星团 M22 中搜寻高速星. 分析结果表明, M22 可能存在 90 颗高速星, 它们相对于星团的切向速度为 43–84 km/s, 平均误差约 12 km/s. 计算表明, M22 中心的理论逃逸速度约 31 km/s, 小于高速星的空间速度, 这些高速星可能都处于非引力束缚状态. 分析还表明, 这些高速星可能是在最近的 1 Ma 内得到加速, 并将于 1 Ma 内逃出星团的潮汐半径成为场星. 最后讨论了这些高速星可能的起源.

关键词 球状星团, M22, 自行, 颜色-星等图, 逃逸速度

PACS: 98.20.Gm, 98.20.-d, 98.10.+z, 97.10.Wn, 97.10.Zr

doi: 10.1360/SSPMA2014-00339

球状星团(Globular Cluster)是银河系中最古老的恒星系统, 是研究恒星演化、恒星系统动力学演化的重要实验室. 球状星团中的高速星是指速度明显高于团星平均速度的恒星, 这些高速星的起源目前还不清楚. 双星对球状星团的动力学演化可能起重要影响^[1–3], 研究发现, 一些球状星团中可能存在中等质量黑洞^[4–8]. 因此, 单星-双星(或双星-双星)、双星-黑洞以及单星-双黑洞之间的密近交会也许能解释球状星团中的高速星起源^[9–15]. 1979 年, Gunn 等人^[16]在球状星团 M3 核心区发现两颗红巨星分别以 17.0 km/s 和 -22.9 km/s 的视向速度相对星团运动, 是核心区速度弥散(4.9 km/s)的 3.5 和 4.5 倍, 速度明显高于其他团星. 1991 年, Meylan 等人^[17]在球状星团 47 Tucanae

发现两颗红巨星分别以 -36.7 km/s 和 +32.4 km/s 的视向速度相对于星团运动, 是核心区速度弥散(9.1 km/s)的 4.0 和 3.6 倍, 速度同样明显高于其他团星. 2012 年, Lützgendorf 等人^[18]在球状星团 NGC 2808 核心区发现两颗红巨星分别以 40 km/s 和 45 km/s 的视向速度相对于星团运动, 是核心区速度弥散(13.4 km/s)的 3 和 3.4 倍, 与其他团星的速度差异也很明显. 由于目前为止在球状星团中发现的高速星数量很少, 不利于对高速星物理性质和起源的深入研究.

目前球状星团的视向速度数据仍然比较缺乏, 但自行数据要丰富得多, 利用高精度自行数据可能会在球状星团中发现更多的高速星. 本文尝试利用高精度自行数据在球状星团 M22($l=9.89^\circ$, $b=-7.55^\circ$)

引用格式: 高新华. 搜寻球状星团 M22 中的高速星. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 039701

Gao X H. Searching for high-velocity stars in the globular cluster M22 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 039701, doi: 10.1360/SSPMA2014-00339

中寻找高速星, 选 M22 作为目标星团的主要原因是它离我们较近(~ 3.2 kpc^[19]), 且已有多位研究者对该星团进行过测光或自行研究^[20-24]. 距离近的星团容易获得高精度的测光和自行数据, 对寻找其中的高速星非常有利.

1 数据与方法

1.1 数据

我们利用 Zloczewski 等人^[24]提供的星表数据, 该星表包含 M22 天区(530×530 arcsec²)10961 颗恒星的测光和相对自行数据, 同时有相对自行和测光数据(V, V-I)的恒星有 10708 颗, 均位于星团中心 6 arcmin 范围以内. 图 1 显示团星与场星的自行矢点图, 团星近似圆高斯分布, 场星近似椭圆高斯分布. 根据自行分布特征, 用 K-means 算法^[25]对 10708 颗恒星进行了聚类分析. K-means 算法的基本原理是按属性将对象聚集到指定的 K 个簇中, 同簇的对象有最高的相似度, 不同簇的对象相似度较小. 当选取 K=2 时(指明只有团星和场星两个簇), 得到团星和场星的质心位置坐标分别为 $(-0.003, 0.016)$ mas/a 和 $(-11.558, 1.155)$ mas/a. 需要强调的是高速星的速度明显高于团星平均速度, 很容易被传统的成员判定法^[26-28]误判为场星, K-means 算法则能避免这一点. 用 K-means 算法分离出的 8714 颗团星中有 8322 颗($\sim 96\%$)被

图 1 10708 颗恒星的 K-means 聚类结果, 红点和黑点分别表示团星和场星

Figure 1 The clustering results of the 10708 stars based on the K-means algorithm, the red and black dots indicate the cluster and field stars, respectively.

Zloczewski 等人^[24]判为团星, 分离出的场星均被 Zloczewski 等人^[24]判为场星. 图 2 显示绝大多数恒星的自行的精度好于 1 mas/a, 满足了寻找高速星的精度要求.

1.2 方法

高速星的速度明显高于团星平均速度, 挑选高速星需要先知道团星的内禀速度弥散, 利用距 M22 中心 2.5 arcmin 以内(约 2 倍核半径^[19])的 1206 颗团星计算了内禀自行弥散. 根据以下公式^[29]:

$$\sigma'_\alpha{}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_{\alpha i} - \overline{\mu}_\alpha)^2, \quad (1)$$

$$\sigma'_\delta{}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_{\delta i} - \overline{\mu}_\delta)^2, \quad (2)$$

先计算出 1206 颗团星的自行观测弥散. 其中, $(\sigma'_\alpha, \sigma'_\delta)$ 是赤经、赤纬两个方向的自行观测弥散, N 为恒星数量, $(\mu_{\alpha i}, \mu_{\delta i})$ 为第 i 颗团星在赤经、赤纬两个方向的自行, $(\overline{\mu}_\alpha, \overline{\mu}_\delta)$ 是 N 颗恒星在赤经、赤纬两个方向的自行平均值. 再根据以下公式^[29]:

$$\sigma_\alpha{}^2 = \sigma_\alpha'^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{\alpha i}^2, \quad (3)$$

$$\sigma_\delta{}^2 = \sigma_\delta'^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_{\delta i}^2, \quad (4)$$

扣除恒星的自行观测误差, 得到 1206 颗团星的自行内禀弥散. 其中, $(\sigma_\alpha, \sigma_\delta)$ 是 N 颗团星在赤经、赤纬两个方向的自行内禀弥散, $(\varepsilon_{\alpha i}, \varepsilon_{\delta i})$ 是第 i 颗团星在赤经、赤纬两个方向的自行观测误差. 最终得到 1206 颗团星的自

图 2 10708 颗恒星的自行误差直方图

(a) 赤经方向误差; (b) 赤纬方向误差

Figure 2 The histograms of the proper-motion errors for the 10708 stars, the proper-motion errors in the direction of Galactic longitude (a) and latitude (b).

行内禀弥散为 $(\sigma_\alpha, \sigma_\delta)=(0.66\pm0.03, 0.67\pm0.03)$ mas/a. 根据图 1 由 K -means 算法分离出的 8714 颗团星的自行分布情况, 我们从中挑选总自行介于 3–6 倍自行内禀弥散(2.8–5.7 mas/a)之间的恒星作为候选高速星. 因为 6 倍自行内禀弥散外的恒星属于数量极少的离群点, 难以认定是否团星. 再从颜色-星等图上剔除明显不属于团星的候选高速星, 最终得到 90 颗高速星, 它们均位于约 4 倍核半径以内, 图 3 显示这 90 颗高速星的自行分布以及在颜色-星等图上的位置.

2 高速星的运动学性质

根据自行数据和公式(5)和(6)可以计算任意一颗高速星相对于星团整体的切向速度:

$$V_t = kD\mu_{\text{tot}}, \quad (5)$$

$$\mu_{\text{tot}} = \sqrt{\mu_\alpha^2 + \mu_\delta^2}, \quad (6)$$

其中, V_t 是高速星的切向速度, $k=4.74$ 是单位转换因子, 当自行和距离分别以 arcsec/a 和 pc 为单位时速度单位是 km/s. D 是星团距离, μ_{tot} 是总自行, (μ_α, μ_δ) 是赤经、赤纬两个方向的自行. 当距离取 $D=3200$ pc 时^[19], 计算出这 90 颗高速星的切向速度介于 43–84 km/s 之间(图 4(a)), 平均误差约 12 km/s. 公式(5)表明距离和总自行的误差都对切向速度的总误差有贡献, 利用

以下公式:

$$\sigma(V_t) = k\sqrt{D^2\sigma^2(\mu_{\text{tot}}) + \mu_{\text{tot}}^2\sigma^2(D)}, \quad (7)$$

计算了总自行 μ_{tot} 和距离 D 的误差所引起的切向速度的误差 $\sigma(V_t)$, k 是单位转换因子, $\sigma(\mu_{\text{tot}})$ 是总自行误差, $\sigma(D)$ 是距离误差. Monaco 等人^[30]得到 M22 的绝对距离模数为 12.56 ± 0.2 mag(3200 ± 300 pc), 利用该距离和公式(7)计算得到的切向速度误差与不考

图 3 90 颗高速星的自行分布(a)以及在颜色-星等图上的位置(b), 红点表示高速星, 黑点表示其他团星, (a)中蓝圈中心为(0, 0) mas/a, 半径为 3 倍自行内禀弥散(2.8 mas/a)

Figure 3 The vector-point diagram (VPD) of the proper motions of the 90 high-velocity stars (a), the positions of the 90 high-velocity stars in the color-magnitude diagram (CMD) (b), the red and black dots indicate the cluster and field stars, respectively. The center of the blue circle (a) is (0, 0) mas/a, the radius of the blue circle indicates 3 times the intrinsic proper-motion dispersion (2.8 mas/a).

图 4 (a) 90 颗高速星的切向速度分布, (b) 距 M22 中心 r 处的理论逃逸速度, (c) 90 颗高速星的切向速度与离星团中心的投影距离, 曲线是理论逃逸速度

Figure 4 The histogram of the tangential velocities of the 90 high-velocity stars (a), the theoretical escape velocity at a distance of r from the cluster center (b), the tangential velocities and projection distances from the cluster center of the 90 high-velocity stars (c), the curve shows the theoretical escape velocity at a projection distance of d .

虑距离误差(3200 pc)的值的差别很小. 图 3(b)显示 M22 的主序和巨星支较宽, 这是由 M22 的较差红化^[23,30]和多星族成分^[31-35]共同导致的. Monaco 等人^[30]估计的 M22 的较差红化最大为 $\Delta E(B-V) \sim 0.06$ mag, 他们在计算距离模数时已考虑了较差红化, 我们认为较差红化对切向速度的误差贡献不明显.

这 90 颗高速星是否处于引力束缚状态取决于它们所在位置的逃逸速度. 利用 Plummer 引力势模型^[36]可以计算星团各处的理论逃逸速度:

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a^2}}, \quad (8)$$

$$V_{\text{esc}}(r) = \sqrt{-2\Phi(r)}, \quad (9)$$

$$R_c = 0.65a, \quad (10)$$

其中 $\Phi(r)$ 是距星团中心 r 处的引力势, G 是万有引力常数, M 是星团的质量, a 是常数, $V_{\text{esc}}(r)$ 是距星团中心 r 处的理论逃逸速度, R_c 是星团核半径. 当星团的核半径和距离分别取 1.33 arcmin 和 3200 pc 时^[19], 核半径对应的线尺度为 $R_c = 1.24$ pc. 当星团的质量取 $2.12 \times 10^5 M_\odot$ ^[21]时, 距离星团中心 r 处的理论逃逸速度如图 4(b)所示. 星团中心的理论逃逸速度约 31 km/s, 这与 McLaughlin 等人^[37]给出的结果(~ 34 km/s)符合得很好.

我们还利用 Gnedin 等人^[38]给出的球状星团核心区逃逸速度和速度弥散关系:

$$V_{\text{esc}} / \sigma_c = 3.7 + 0.9(c - 1.4), \quad (11)$$

重新估算了 M22 的核心区逃逸速度. 其中, V_{esc} 是星团核心区逃逸速度, σ_c 是核心区速度弥散, c 是 King 模型^[39]中描述星团聚集程度的参数. 取星团核心区视向速度弥散 $\sigma_r = 6.6 \pm 0.8$ km/s^[21], 根据速度各向同性有 $\sigma_c = \sqrt{3}\sigma_r$. 再根据 $c = 1.38$ ^[19], 则 M22 核心区的逃逸速度约为 42 ± 5 km/s, 比基于 Plummer 模型的结果大, 与 90 颗高速星的最小切向速度 43 km/s

接近. 需要指出的是这里并没有考虑 90 颗高速星的视向速度, 高速星的空间速度应大于切向速度. 另外, 90 颗高速星并非都位于星团核心处, 计算表明逃逸速度是由内向外减小(图 4(b)). 假设 90 颗高速星距星团中心的投影距离等于离开星团中心的距离, 图 4(c)显示了它们的切向速度(包含误差)、离星团中心的投影距离和理论逃逸速度. 图 4(c)切向速度的误差包含了距离误差的贡献, 高速星离星团中心的真实距离要大于投影距离, 有理由相信这 90 颗高速星可能正处于高速逃逸状态. 这 90 颗高速星的基本性质已列于表 1 中, 为了说明情况文中只给出表格样例, 详细信息见电子表.

3 讨论和结论

球状星团中的高速星有助于我们深入了解星团内部的恒星动力学过程, 但目前已发现的高速星数量太少. 本文利用高精度自行和测光数据在较近的球状星团 M22 中发现了 90 颗高速星, 计算表明它们的运动速度明显大于团星的平均速度和中心逃逸速度, 可能正处于高速逃逸状态. 根据这些高速星的速度可以约束它们获得当前速度的时间, M22 的潮汐半径为 30 pc^[19], 一颗速度为 50 km/s 的高速星穿越 M22 所需的时间仅为约 1 Ma. 这表明这些高速星是在最近的 1 Ma 内得到加速, 并且将在未来的 1 Ma 内全部逃离星团. 高速星从形成到完全逃离只需相当短的时间, 有理由相信已有相当数量的高速星逃离了 M22.

有研究指出 $10^3 M_\odot$ 量级的黑洞可能普遍存在于球状星团中^[4], 理论研究表明黑洞俘获双星中的一颗会将另一颗高速抛出^[9,10], 这也许能解释 M22 中高速星的起源. 最近 Strader 等人^[40]指出: M22 中可能存在 5–100 个恒星级黑洞, 这些黑洞的能使星团核心区恒

表1 90颗高速星的基本性质^{a)}

Table 1 The fundamental properties of the 90 high-velocity stars

ID	R (arcmin)	RA (degree)	DEC (degree)	$pmRA$ (mas/a)	$epmRA$ (mas/a)	$pmDEC$ (mas/a)	$epmDEC$ (mas/a)	V (mag)	$V-I$ (mag)	V_t (km/s)	eV_t (km/s)
01	4.202	279.065047	-23.842307	-2.66	1.46	-0.89	0.58	18.537	1.132	43	22
02	4.662	279.146368	-23.969727	2.81	0.83	0.14	0.50	18.489	1.029	43	13
03	3.749	279.085648	-23.965896	-2.65	0.20	0.95	0.47	18.195	1.074	43	05
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

a) ID: 编号; R : 团心角距; RA : 赤经; DEC : 赤纬; $pmRA$: 赤经自行; $epmRA$: 赤经自行误差; $pmDEC$: 赤纬自行; $epmDEC$: 赤纬自行误差; V : V波段视星等; $V-I$: V-I颜色; V_t : 切向速度; eV_t : 切向速度误差(包含距离误差的贡献)

星的速度弥散增大, M22 的核半径比大多数球状星团的更大可能就是这个原因. 核心区恒星的速度弥散增加, 处于麦克斯韦分布高速尾端的恒星数目也会相应增多, 这可能是本文发现的 90 颗高速星的一种形成途径. 单星-双星或双星-双星之间的密近交会产

生高速星的可能性也不能排除, 并且双星可能是影响球状星团动力学演化的重要因素^[41]. 另外, M22 在银河系中的位置和空间速度表明它刚以约 106 km/s 的速度穿过银盘^[20,42], 这种高速冲击是否会产生高速星也值得进一步研究.

致谢 感谢审稿人仔细审阅本文并提出了建设性意见, 感谢编辑的建议.

参考文献

- Heggie D C. Binary evolution in stellar dynamics. *Mon Not R Astron Soc*, 1975, 173: 729–787
- Hills J G. Encounters between binary and single stars and their effect on the dynamical evolution of stellar systems. *Astron J*, 1975, 80: 809–825
- Elson R, Hut P, Inagaki S. Dynamical evolution of globular clusters. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1987, 25: 565–601
- Miller M C, Hamilton D P. Production of intermediate-mass black holes in globular clusters. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 330: 232–240
- Baumgardt H, Makino J, Hut P. Which globular clusters contain intermediate-mass black holes? *Astrophys J*, 2005, 620: 238–243
- Gebhardt K, Rich R M, Ho L C. An intermediate-mass black hole in the globular cluster G1: Improved significance from new Keck and Hubble Space Telescope observations. *Astrophys J*, 2005, 634: 1093–1102
- Noyola E, Gebhardt K, Kissler-Patig M, et al. Very large telescope kinematics for omega Centauri: Further support for a central black hole. *Astrophys J*, 2010, 719: L60–L64
- Lützgendorf N, Kissler-Patig M, Noyola E, et al. Kinematic signature of an intermediate-mass black hole in the globular cluster NGC 6388. *Astron Astrophys*, 2011, 533: A36–1–A36–12
- Hills J G. Hyper-velocity and tidal stars from binaries disrupted by a massive Galactic black hole. *Nature*, 1988, 331: 687–689
- Yu Q, Tremaine S. Ejection of hypervelocity stars by the (binary) black hole in the galactic center. *Astrophys J*, 2003, 599: 1129–1138
- Gualandris A, Zwart S P, Eggleton P P. N-body simulations of stars escaping from the Orion nebula. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 350: 615–626
- Gualandris A, Zwart S P, Sipior M S. Three-body encounters in the Galactic Centre: the origin of the hypervelocity star SDSS J090745. 0+024507. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 363: 223–228
- Gvaramadze V V, Gualandris A, Zwart S P. On the origin of high-velocity runaway stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 396: 570–578
- Baumgardt H, Gualandris A, Zwart S P. Ejection of hypervelocity stars from the Galactic Centre by intermediate-mass black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 372: 174–182
- Mapelli M, Colpi M, Possenti A, et al. The fingerprint of binary intermediate-mass black holes in globular clusters: suprathermal stars and angular momentum alignment. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 364: 1315–1326
- Gunn J E, Griffin R F. Dynamical studies of globular clusters based on photoelectric radial velocities of individual stars. I-M3. *Astron J*, 1979, 84: 752–773
- Meylan G, Dubath P, Mayor M. Two high-velocity stars shot out from the core of the globular cluster 47 Tucanae. *Astrophys J*, 1991, 383: 587–593
- Lützgendorf N, Gualandris A, Kissler-Patig M, et al. High-velocity stars in the cores of globular clusters: the illustrative case of NGC 2808. *Astron Astrophys*, 2012, 543: 1–12
- Harris W E. A catalog of parameters for globular clusters in the Milky Way. *Astron J*, 1996, 112: 1487–1488
- Cudworth K M. Proper motions, membership, and photometry in the globular cluster M22. *Astron J*, 1986, 92: 348–357
- Peterson R C, Cudworth K M. Proper motions and radial velocities in the globular cluster M22 and the cluster distance. *Astrophys J*, 1994, 420: 612–631
- HWAN D. The VI CCD Photometry of the Globular Cluster M22. *J Kor Astron Soc*, 1998, 31: 67–74
- Richter P, Hilker M, Richtler T. Stroemgren photometry of globular clusters: m55 & m22. *Astron Astrophys*, 1999, 350: 476–484
- Zloczewski K, Kaluzny J, Rozycka M, et al. A proper motion study of the globular clusters M4, M12, M22, NGC 3201, NGC 6362 and NGC 6752. *Acta Astron*, 2012, 62: 357–375

- 25 韩家炜, 坎伯, 裴健. 数据挖掘: 概念与技术. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2012
- 26 Vasilevskis S, Klemola A, Preston G. Relative proper motions of stars in the region of the open cluster NGC 6633. *Astron J*, 1958, 63: 387–395
- 27 Sanders W L. An improved method for computing membership probabilities in open clusters. *Astron Astrophys*, 1971, 14: 226–232
- 28 Zhao J L, He Y P. An improved method for membership determination of stellar clusters with proper motions with different accuracies. *Astron Astrophys*, 1990, 237: 54–60
- 29 Zhao J L, Chen L. Velocity Distance of the open cluster M11. *Chin J Astron Astrophys*, 2007, 7: 572–578
- 30 Monaco L, Pancino E, Ferraro F R, et al. Wide-field photometry of the Galactic globular cluster M22. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 349: 1278–1290
- 31 Marino A F, Sneden C, Kraft R P, et al. The two metallicity groups of the globular cluster M 22: A chemical perspective. *Astron Astrophys*, 2011, 532: A8
- 32 Roederer I U, Marino A F, Sneden C. Characterizing the heavy elements in globular cluster M22 and an empirical s-process abundance distribution derived from the two stellar groups. *Astrophys J*, 2011, 742: 37
- 33 Joo S J, Lee Y W. Star formation histories of globular clusters with multiple populations. I. ω CEN, M22, and NGC 1851. *Astrophys J*, 2013, 762: 36
- 34 D'Orazi V, Lucatello S, Lugaro M, et al. Fluorine variations in the globular cluster NGC 6656 (M22): Implications for internal enrichment timescales. *Astrophys J*, 2013, 763: 22
- 35 Marino A F, Milone A P, Lind K. Horizontal branch morphology and multiple stellar populations in the anomalous globular cluster M 22. *Astrophys J*, 2013, 768: 27
- 36 Plummer H C. On the problem of distribution in globular star clusters. *Mon Not R Astron Soc*, 1911, 71: 460–470
- 37 McLaughlin D E, van der Marel R P. Resolved massive star clusters in the Milky Way and its satellites: Brightness profiles and a catalog of fundamental parameters. *Astrophys J Suppl*, 2005, 161: 304–360
- 38 Gnedin O Y, Zhao H S, Pringle J E, et al. The unique history of the globular cluster ω centauri. *Astrophys J*, 2002, 568: L23–L26
- 39 King I. The structure of star clusters. I. an empirical density law. *Astron J*, 1962, 67: 471–485
- 40 Strader J, Chomiuk L, Maccarone T J, et al. Two stellar-mass black holes in the globular cluster M22. *Nature*, 2012, 490: 71–73
- 41 Meylan G, Heggie D C. Internal dynamics of globular clusters. *Astron Astrophys Rev*, 1997, 8: 1–143
- 42 Cudworth K M, Hanson R B. Space velocities of 14 globular clusters. *Astron J*, 1993, 105: 168–172

Searching for high-velocity stars in the globular cluster M22

GAO XinHua^{*}

School of Information Science and Engineering, ChangZhou University, Changzhou 213164, China

High-velocity stars in globular cluster are important tools for the studies of internal star dynamics. In this work, we attempt to search high-velocity stars in the globular cluster M22 using high-precision proper-motion and photometric data. We find 90 high-velocity stars in this cluster, the tangential velocities of these stars are determined to be in the range of 43–84 km/s, the average uncertainty is about 12 km/s. The central escape velocity of M22 is estimated to be about 31 km/s, which is significantly lower than the spatial velocities of these high-velocity stars. The results of our analysis indicate that these high-velocity stars should be accelerated within the recent 1 Ma, and they will escape out of the cluster within the next 1 Ma. Possible origins for these high-velocity stars are discussed.

globular cluster, M22, proper motion, color-magnitude diagram, escape velocity

PACS: 98.20.Gm, 98.20.-d, 98.10.+z, 97.10.Wn, 97.10.Zr

doi: 10.1360/SSPMA2014-00339