

文章编号: 1000-8349(2012)04-438-15

超高速星搜寻研究进展

李荫碧^{1,2}, 罗阿理¹, 赵刚¹

(1. 中国科学院 光学天文重点实验室, 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 超高速星是一类能够从银河系逃逸的恒星, 它们是银心存在超大质量黑洞的有力证据, 也是研究银河系晕的形状、银河系引力势模型以及银心初始质量函数等问题的有力工具。首先介绍了最早发现的 3 颗早型大质量超高速星, 其次介绍了海量测光和光谱数据中早型大质量超高速星、晚型小质量超高速星以及处于恒星演化晚期的 sdB 型超高速星的系统搜寻及起源研究。

关键词: 超高速星; 分光巡天; 银河系晕

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

天文学家认为有核球的星系中心可能都存在一个超大质量黑洞, 1988 年 Hills^[1]首次提出, 银心超大质量黑洞与双星的相互作用会将双星中的一颗以大于 $4000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度抛射出去, 他把这种以很高速度抛射出去的恒星称为“超高速星”, 并且预言超高速星的发现将是一个致密恒星环境中心大质量黑洞存在的必然结果和决定性证据。2003 年, 于清娟等人^[2]利用损失锥理论、现实的银河系中心的恒星分布及与观测更加符合的引力势模型, 估计超高速星从银心被抛射出去的速度大于 $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 并预言银河系中心至太阳半径内有大约 1000 颗超高速星。2005 年, Brown 等人^[3]在银晕的蓝水平支 (BHB) 星样本中发现了第一颗超高速星, 它是一颗 B 型星, 位于距离银心 110 kpc 的遥远银晕中, 相对于银心的视向速度为 $+709 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这颗超高速星的发现为银心超大质量黑洞的存在提供了有力的证据。同一年, 另外两颗银晕中的超高速星也相继被发现^[4, 5], 它们分别是一颗 B 型主序星和一颗富氦的 sdO 型星。随后, 天文学家有计划地开展了一系列超高速星搜寻工作。Brown 等人经过多次搜寻, 在 SDSS 的测光数据中发现 15 颗能够从银河系逃逸的早型大质量超高速星^[6-11], Tillich 等人^[12]在薛香香等人的光谱数据中发现了一颗 A 型主序超高速星, Kollmeier 等人^[13, 14]和李荫碧等人^[15]也分别在 SDSS 的光谱数据中发现了贫金属 F 和 G 型超高速星候选体。这些超高速星的发现将为很多问题的研究提供重要工具, 比如超高速星的密度和速度

收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-04-18

资助项目: 国家自然科学基金 (10821061, 10973021)

分布可用来研究银心大质量黑洞的性质及其周围环境^[16], 它们的类型可以反映前身双星中伴星的类型^[17], 它们的轨道可以用来研究银河系暗物质晕的形状和方向^[18], 它们还可以用来研究银心的质量分布函数、银心大质量恒星的起源及恒星与银心大质量黑洞相互作用的历史等^[4-7]。

Hills 提出超高速星是由银心超大质量黑洞瓦解双星产生的, 于清娟等人拓展了这一理论^[2], 提出两个恒星的引力碰撞会将其中一颗恒星抛射出去形成超高速星, 单个恒星与银心双黑洞的相互作用也可以产生超高速星。另外, 还有一些动力学机制也可以产生超高速星。首先, 大质量星系演化早期是非稳定的, 这一时期 Ia 型超新星爆炸等剧烈活动会产生一些小质量的能够接近银河系逃逸速度的高速星, 它们与银河系一起演化至今; 其次, 双星中超新星的爆发会把它的伴星抛射出去形成高速星, 伴星的最大抛射速度是双星的轨道速度^[10, 19], 银盘上致密恒星区域的三体或多体作用也会把其中的恒星以较高的速度抛射出去^[20, 21]; 最后, 其它星系也可以产生超高速星, 它们在银河系引力势的作用下运动到银晕中, 比如 M31 或 M32 中心超大质量黑洞瓦解双星产生的年老小质量超高速星^[22]、银河系及其矮星系潮汐作用剥落的高速星流及单个年老的超高速星^[23, 24]。

本文第 2 章介绍了 Brown 等人^[3]、Hirsch 等人^[4]和 Edelmann 等人^[5]意外发现的 3 颗超高速星及他们对这 3 颗超高速星所做的分析和研究; 第 3 章介绍了 2005 年以后天文学家开展的有计划的超高速星搜寻工作, 包括早型大质量超高速星、晚型小质量超高速星和处于恒星演化晚期的 sdB 型超高速星的系统搜寻; 第 4 章总结了本文的主要内容, 并对相关领域今后计划开展的工作进行了展望。

2 最早意外发现的 3 颗超高速星及起源研究

2005 年, Brown 等人^[3]在观测和证认 36 颗斯隆巡天 (SDSS) BHB 星候选体时发现了第一颗超高速星 SDSS J090744.99+024506.9, 它是起源于银心的晚 B 型恒星。同一年, Hirsch 等人^[4]和 Edelmann 等人^[5]分别在 100 颗 SDSS 的 O 型亚矮星 (sdO) 及 B 型亚矮星 (sdB) 中发现了两颗超高速星 US 708 和 HE 0437。这 3 颗超高速星的发现激发了人们对超高速星搜寻的热情, 也为进一步研究银心周围环境和银河系暗物质晕的结构等问题提供了可能的方法和手段。表 1 中给出了这 3 颗超高速星的基本参数, 下面 3 小节将对它们做详细的介绍。

表 1 最早发现的 3 颗超高速星的基本参数

星名	l /deg	b /deg	v_{\odot} /km·s ⁻¹	v_{rf} /km·s ⁻¹	T_{eff} /K	$\lg(g)$ /cgs	metallicity /dex
SDSS J090744.99 +024506.9	227.33	+31.33	853	709	10 500	—	[Fe/H] \approx 0
US 708	175.99	+47.05	708	751	44 500	5.23	[He/H] = +0.99
HE 0437-5439	263.04	-40.91	723	563	20 350	3.77	[He/H] = -0.94

注: (l , b) 是银道坐标系下的位置坐标, v_{\odot} 和 v_{rf} 分别是相对于太阳和银心的视向速度, T_{eff} 、 $\lg(g)$ 和 metallicity 则分别是有效温度、表面重力和金属丰度。

2.1 第一颗超高速星 SDSS J090744.99+024506.9

2003 年, Brown 等人^[3]使用 6.5 m 多镜面望远镜 (MMT) 观测从 SDSS 早期和 DR1 测光数据中随机挑选的 36 颗 BHB 星样本^[25], 并在它们的径向速度 (v_{rf}) 分布中发现了一颗太阳金属丰度^[26] 低表面重力^[27, 28] B9.2 型^[29] 超高速星 SDSS J090744.99+024506.9 (如图 1), 它可能是一颗热的 BHB 星, 也可能是一颗晚 B 型主序星。由于在它的有效温度附近, 水平支与主序相交, 表面重力无法区分 BHB 星和主序星, 因此 Brown 等人分别估算了两种情况下的距离^[28, 30, 31], 并最终采用两个距离的均值 55 kpc 作为这颗星的距离。Brown 等人认为 SDSS J090744.99+024506.9 可能起源于银心, 理由如下: (1) 它的视向速度与本星系群中其它任何成员的视向速度都不同; (2) 它不可能是高速云中的超高速星, 高速云^[32] 是主要由中性氢组成的具有较快速度 ($|V_{\text{LSR}}| \geq 90 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 的星际气体, 但它们的速度弥散只有 $120 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[33], 因此高速云中的恒星无法达到如此高的视向速度; (3) 假设恒星样本的速度服从高斯分布, 如果样本都是具有相同运动学性质的银河系晕星, 那么在 10^9 个样本中才能观测到一颗位于速度分布 6σ (σ 是速度弥散) 之外的恒星, 但实际上 Brown 等人在 10^4 个银河系晕星样本中就观测到一颗位于速度分布 6σ 之外的恒星, 因此它不大可能是高速的银河系晕星, 而是与银河系晕星具有不同运动学性质的恒星; (4) 银盘上的 Ia 型超新星爆炸^[19] 以及多体动力学^[20] 作用产生的大质量高速星的最大速度是 $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[34], 显然它不可能是在银盘上通过这些机制产生的高速星; (5) 假设视向速度是它的空间总速度, 则从银心运动到当前位置所需的时间 ($< 80 \text{ Ma}$) 比 B9 型主序星和 BHB 星的年龄都小, 这意味着它有足够的时间从诞生地银心运动到当前位置; (6) 它的金属丰度与太阳相同, 这也与银心附近恒星的金属丰度一致。

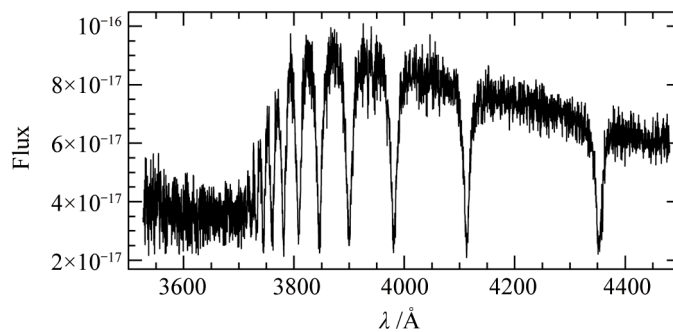


图 1 SDSS J090744.99+024506.9 的光谱

2.2 第二颗超高速星 US 708

Hirsch 等人^[4]在 100 个 SDSS sdO 型恒星光谱中发现 US 708 (SDSS J093320.86+441705.4) 的谱线线心移动了 10 \AA , 他们用凯克 I 望远镜 (Keck I) 重新观测了这颗星 (如图 2), 发现它是一颗距离银心 25.8 kpc ^[35, 36] 的富氮 sdO 型超高速星。Hirsch 等人认为 US 708 起源于银心, 那么从银心抛射出来前它应该是密近双星中的一颗子星, 然而富氮 sdO 型星成为双星的概率很低^[37], 而且它们主要通过两个氦白矮星的并合产生^[38], 因此 US 708 是氦白矮双星与银心超大质量黑洞作用的过程中并合产生的。随后其他人也深入研究了 US 708 的

起源并提出了不同的看法, 比如, Perets 等人^[39]认为 US708 可能是从银心抛射出来的双星, 经过演化和并合形成一颗 sdO 型星。由于白矮星和氦星组成的双星系统存在短的轨道周期, Justham 等人^[40]指出这样的双星系统中的超新星爆发是 US 708 这类恒星产生的很自然的解释。王博等人^[41]进一步研究了白矮星与氦星组成的双星系统发生 Ia 型超新星爆炸后伴星性质的分布情况, 他们发现这样的双星系统发生 Ia 型超新星爆炸后伴星具有较高的空间速度 ($> 400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), 认为这一机制可以作为超高速星, 特别是像 US 708 这类超高速星产生的合理解释。

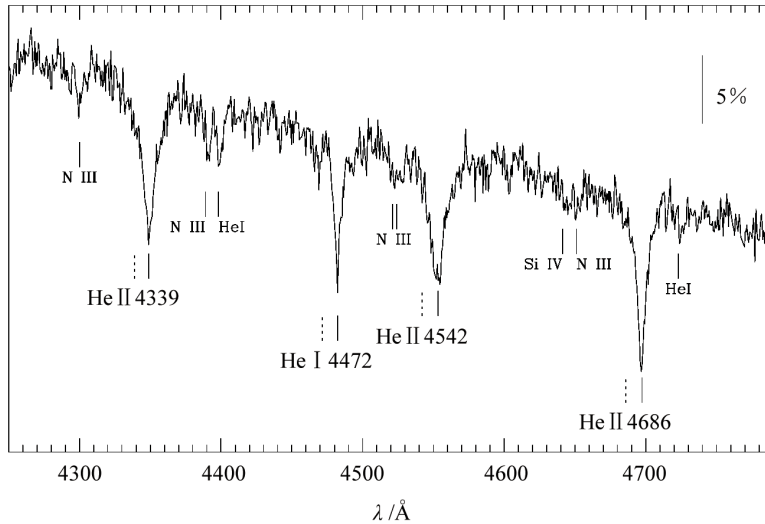


图 2 US 708 的光谱

2.3 第三颗超高速星 HE 0437

Edelmann 等人^[5]在对 sdB 型星候选体的观测和证认中发现了一颗距离太阳 (61 ± 12) kpc 的 B 型主序超高速星 HE 0437^[42]。根据 Allen 等人的引力势模型^[43], HE 0437 能够从银河系逃逸。假设 HE 0437 起源于银心, 从银心运动到当前位置则需要 $(99 \pm 19) \text{ Ma}$ ^[44], 远大于它的主序年龄 (25 Ma)。由于起源地和引力势模型会影响运行时间, Edelmann 等人分别测试了它们对运行时间的影响大小, 结果不管 HE 0437 从银盘哪个区域起源, 运动到当前位置的时间都大于 80 Ma; 即使引力势模型的值提高 50%, 对运行时间的影响都不超过 5 Ma。因此, 如果 HE 0437 是起源于银心的 B 型主序星, 则它的主序年龄和运行时间之间存在矛盾。有两种方法可以解决两者之间的矛盾: (1) 把 HE 0437 看做是从银心抛射出的由两个质量为 $4 M_{\odot}$ 的恒星组成的密近双星经过并合形成的蓝离散星 (BSS), 质量为 $4 M_{\odot}$ 的恒星的主序年龄为 165 Ma ^[30], 大于 HE 0437 的运行时间 (99 Ma); (2) 把 HE 0437 看做是起源于 LMC 的超高速星, Edelmann 等人也是用这种机制解释了 HE 0437 的起源。不过 LMC 起源需要两个假设: (1) 假设 HE 0437 的丰度与 LMC 的丰度一致, 即太阳金属丰度的一半; (2) 假设 HE 0437 相对于大麦哲伦云 (LMC) 的自行是 $2 \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$ 或者更高, 这样才能

解释 HE 0437 偏离 LMC 中心 16° 。为了证实 LMC 起源的可靠性, Brown 等人^[45]于 2006 年和 2009 年两次使用哈勃太空望远镜 (HST) 测量了 HE 0437 的绝对自行 ($< 2 \text{ mas}\cdot\text{a}^{-1}$), 并用该自行值和 Kenyon 等人的引力势模型^[46]计算了 HE 0437 和 LMC 的轨道, 以及 HE 0437 在银盘上可能的起源区域, 结果显示 HE 0437 在 3σ 置信度上并非起源于 LMC, 而是银心起源的年龄为 20 Ma、质量为 $9 M_\odot$ 的 BSS^[47, 48]。Brown 等人分别用陆由俊等人^[17]和 Perets 等人^[39]的超高速双星产生理论解释了 HE 0437 的起源。

3 超高速星的系统搜寻及起源研究

前 3 颗超高速星激发了天文学家在海量恒星测光和光谱数据中搜寻超高速星的热情。最早开展系统超高速星搜寻工作的是 Brown 及其合作者^[6-10], 他们先后在 SDSS DR4、DR5、DR6、DR7 和 DR8 的测光数据中发现并证认了 15 颗能够从银河系逃逸的大质量超高速星。另外, Tillich 等人^[12]也在 10 000 颗晕星样本中发现了一颗大质量主序超高速星。如果银心附近初始质量函数是 Salpeter 函数, 那么小质量超高速星的数目应该比大质量超高速星的数目多。然而, Brown 等人和 Tillich 等人并没有发现小质量超高速星, 这或许因为银心附近环境更有利于大质量恒星的产生, 小质量超高速星可能根本不存在; 或许因为银心附近虽然有利于低质量恒星形成, 但由于银河系晕中年老的小质量恒星与小质量超高速星很相似, 使得小质量超高速星被淹没在具有相似测光、质量、年龄和光谱特性的晕族恒星中而难以发现。因此, 搜寻小质量超高速星是非常必要的工作, 它们是认识银心附近恒星形成历史和限制超高速星的喷射机制等问题的重要工具。Kollmeier 等人^[13, 14]先后两次在 SDSS 恒星光谱数据中系统搜寻过富金属 F 和 G 型超高速星, 然而他们两次都没有找到富金属超高速星, 不过他们意外地发现了 6 颗贫金属 F 和 G 型星超高速星候选体。李荫碧等人^[15]也在 SDSS DR7 370 000 恒星光谱数据中系统地搜寻了小质量超高速星, 他们没有对样本的金属丰度进行限制, 并且最终发现了 13 颗贫金属 F 和 G 型超高速星候选体。至此, 所有发现的超高速星及候选体中, 只有 US 708 是一颗处于恒星演化晚期的 sdO 型星, 这类恒星年龄很老, 是研究银河系引力势模型的有力工具, 系统地搜寻这类处于恒星演化晚期的超高速星也是非常重要的工作。Tillich 等人^[49]在 SDSS DR6 的光谱数据中系统地搜寻了 sdB 型超高速星候选体, 通过高分辨光谱观测最终证认出 2 颗 sdB 型超高速星。

3.1 早型大质量超高速星的搜寻及起源研究

Brown 等人利用 DR4、DR5 和 DR6 的测光数据在银晕早型星中发现了 13 颗大质量超高速星, 见表 2 中的 HVS4–HVS16。他们在 DR4 数据中进行过 3 次系统的超高速星搜寻^[6-8], 前两次发现了表 2 中的晚 B 型超高速星 HVS4、HVS5、HVS6 和 HVS7; 第三次他们没有发现新的超高速星, 但在暗 B 型星中发现了一颗在束缚轨道上运动的太阳金属丰度 A1 型超高速星候选体, 并且在亮 B 型星中也发现了 4 颗类似的不能从银河系逃逸的超高速星候选体。他们认为这 4 颗超高速星都是起源于银心的 B 型主序星, 因为它们的主序年龄与运行时间一致, 并且它们与本星系群中的任何矮星系之间都没有物理上的联系。2008 年, Przybilla

表 2 Brown 等人在 SDSS DR4、DR5、DR6、DR7 和 DR8 中发现的所有大质量超高速星的基本参数

ID	v_{\odot} /km·s ⁻¹	v_{rf} /km·s ⁻¹	m_g /mag	M_g /mag	R_{GC} /kpc	l /deg	b /deg	星名
HVS1	840	673	19.69	+0.41	76	227.33	+31.33	SDSS J090744.99+024506.88
HVS2	708	718	19.05	+2.6	26	175.99	+47.05	US708
HVS3	723	520	16.20	-2.7	62	263.04	-40.91	HE0437-5439
HVS4	611	559	18.31	-0.66	69	194.76	+42.56	SDSS J091301.01+305119.83
HVS5	553	664	17.56	+0.04	36	146.23	+38.70	SDSS J091759.47+672238.35
HVS6	626	511	18.97	+0.10	61	243.12	+59.56	SDSS J110557.45+093439.47
HVS7	529	396	17.64	-0.19	37	263.83	+57.95	SDSS J113312.12+010824.87
HVS8	489	393	17.94	+0.01	46	211.70	+46.33	SDSS J094214.03+200322.07
HVS9	628	461	18.64	+0.34	47	244.63	+44.38	SDSS J102137.08-005234.77
HVS10	478	423	19.22	+0.21	66	249.93	+75.72	SDSS J120337.85+180250.35
HVS11*	477	307	19.58	+0.68	64	238.77	+40.63	SDSS J095906.47+000853.41
HVS12	552	408	19.61	+0.13	82	247.11	+52.46	SDSS J105009.59+031550.67
HVS13	575	421	20.02	+0.09	101	251.65	+50.64	SDSS J105248.30-000133.94
HVS14	532	396	19.72	-0.25	96	241.78	+53.20	SDSS J104401.75+061139.02
HVS15*	463	322	19.15	-0.29	78	266.51	+55.92	SDSS J113341.09-012114.25
HVS16*	434	345	19.33	-0.03	74	285.86	+67.38	SDSS J122523.40+052233.84
HVS17	246	442	17.43	-0.74	50	73.52	+41.16	SDSS J164156.39+472346.12
HVS18	251	473	19.30	+0.05	75	103.64	-26.77	SDSS J232904.94+330011.47
HVS19	597	490	20.06	+0.35	89	256.05	+63.74	SDSS J113517.75+080201.49
HVS20	504	381	19.81	+0.54	69	262.56	+60.39	SDSS J113637.13+033106.84
HVS21	355	392	19.73	-0.23	100	165.26	+56.11	SDSS J103418.25+481134.57

注: v_{\odot} 和 v_{rf} 分别是相对于太阳和银心的视向速度, m_g 和 M_g 分别是 g 波段的视星等和绝对星等, R_{GC} 是到银心的距离, (l, b) 是银道坐标系下的位置坐标。Brown 等人 2012 年的文章^[11]中使用 Gnedin 等人^[50]的引力势模型重新确认表中所有超高速星能否从银河系逃逸, 他们发现用 * 符号标记的 3 颗超高速星 HVS11、HVS15 和 HVS16 在 Gnedin 等人的引力势模型下不能逃逸 (但它们在 Kenyon 等人的引力势模型下能够逃逸), 它们被重新确定为可能能够从银河系逃逸的超高速星。

等人^[51]重新观测和研究了 HVS7, 发现它是一个化学丰度特殊的有磁场的 B 型主序星, 它的丰度模式可能是在一个磁场稳定并且非对流的大气中由原子扩散引起的, 因此所有关于它诞生地的化学信息都没有保留下来, 高精度天体测量成为确定它起源的唯一手段。表 2 中的 HVS8、HVS9 和 HVS10 是 Brown 等人从 DR5 晚 B 型星样本的视向速度分布中发现的 3 颗 B9 型超高速星^[9], HVS11、HVS12、HVS13、HVS14、HVS15 和 HVS16 则是他们从 DR6 的早 A 型和晚 B 型星样本中发现的超高速星^[10]。其中, HVS8 是一颗质量为 $3 M_{\odot}$ 的太阳丰度主序星; HVS9 可能是质量为 $3 M_{\odot}$ 的 B 型主序星 (距离银心 68 kpc), 也可能是 BHB 星 (距离银心 35 kpc); HVS10 是除 HVS1 外所有已发现的超高速星中最暗的; HVS11 是太阳金属丰度 A1 型主序星; HVS12 是质量为 $2.5 M_{\odot}$ 的太阳金属丰度^[26] A0 型主序星; HVS13 和 HVS14 都是 B9 型主序星; HVS15 和 HVS16 可能是 B9 型主序星 (距离银心 90 kpc), 也可能是 BHB 星 (距离银心 44 kpc)。此外, Brown 等人在 SDSS DR6 中还发现了 4 颗早 A 型超高速星候选体, 无论是主序星还是 BHB 星, 它们都只能在薛香香等人的引力势模型^[52]下从银河系逃逸, 而在 Kenyon 等人^[46]的引力势模型下都不能从银河系逃逸。Brown 等人在 DR4、DR5 和 DR6 中发现 13 颗大质量超高速星的方法是相同的, 但是他们选择早型星样本

时使用的颜色标准、搜寻的天区范围以及所选的晕星类型却不尽相同。他们利用 DR4 数据第一次寻找超高速星时,是在 1900 平方度天区内,在 $(u'-g')_0$ 和 $(g'-r')_0$ 颜色平面中的一个平行四边形区域内挑选暗 B 型星;第二次,他们在 3000 平方度天区内,在比前一次颜色区域内更小的平行四边形区域中挑选暗晚 B 型星;第三次,他们除继续在前面没有观测的暗晚 B 型星中寻找超高速星外,还在 $(u'-g')_0$ 和 $(g'-r')_0$ 颜色平面上更大的不规则区域内寻找亮晚 B 型星,这是他们第一次试图在更亮的晚 B 型样本中寻找超高速星。Brown 等人 DR5 和 DR6 数据中寻找超高速星时,每次都是在一个比前一次数据量更多的样本中进行的。他们利用 DR5 测光数据挑选亮晚 B 型星样本时,虽然颜色选择条件与前一次^[8]相同,但选择的天区范围(7300 平方度)更大;他们挑选暗晚 B 型星样本时,天区范围也是 7300 平方度,但是颜色选择范围比 DR4^[7]增加了一个长方形区域。他们利用 DR6 测光数据搜寻超高速星时,不仅用以前的方法^[9]在晚 B 型星中寻找,还在 $(u'-g')_0$ 和 $(g'-r')_0$ 颜色平面中一个包含早 A 型恒星的梯形区域中寻找超高速星,这是他们第一次在温度更低,质量更小而且更暗的早 A 型星中寻找超高速星。

2012 年, Brown 等人^[11]在 SDSS DR6、DR7 和 DR8 的测光数据中又发现了 5 颗超高速星 HVS17、HVS18、HVS19、HVS20 和 HVS21 (见表 2)。此次他们在星等范围 $17 < g_0 < 20.25$ 内用新的颜色标准选择出 837 颗晚 B 型星,通过观测其中 497 颗星发现了这些超高速星。HVS17 是一颗 B6 型太阳金属丰度质量为 $4 M_{\odot}$ 的恒星,是 Brown 等人发现的有效温度最高的超高速星;HVS18 是一颗太阳金属丰度质量为 $3 M_{\odot}$ 的恒星,是 Brown 等人发现的第一颗位于南银冠的超高速星;HVS19 是一颗 A0 型太阳金属丰度质量为 $2.5 M_{\odot}$ 的恒星,并且与其他许多超高速星一样位于狮子座 (Leo) 方向;HVS20 是一颗 A1 型恒星,也是位于 Leo 方向的超高速星;HVS21 是一颗 B7 型恒星,并且位于大熊星座 (Ursa Major) 方向。由于近期观测工作^[53]倾向于支持更大质量的银河系暗物质晕, Brown 等人在此次工作中使用了 Gnedin 等人^[50]的银晕质量更大的引力势模型,并对所有超高速星能否从银河系逃逸进行重新界定。表 2 中用 * 符号标出的 3 颗超高速星 HVS11、HVS15 和 HVS16 在 Gnedin 等人的引力势模型下不能从银河系逃逸, Brown 等人把它们列为可能能够从银河系逃逸的超高速星。由于超高速星的空间分布很可能与它们的起源密切相关, Brown 等人分析了 16 颗能够从银河系逃逸的超高速星的空间分布,发现呈现各向异性分布,同时还发现这种各向异性分布主要体现在银经方向。原则上,由银心超大质量黑洞抛射出来的超高速星应该是各向同性分布的,但是观测结果与理论预言并不一致, Brown 等人认为两种原因可以解释这种各向异性分布。首先,2010 年陆由俊等人^[54]通过数值模拟发现超高速星各向异性的空间分布可能与其前身双星的各向异性分布有关。他们发现大多数超高速星前身双星进入银心前分布在一个距离银心超大质量黑洞 0.5 pc 顺时针旋转的年轻恒星盘面 (CWS) 上,这意味着大多数超高速星可能起源该盘面或相同方向盘状恒星团,其它超高速星则可能起源于银心一个微型悬臂的北臂或者 CWS 盘面外部弯曲的部分。其次, Brown 等人认为超高速星各向异性的空间分布可能与银河系引力势的各向异性有关。如果银河系引力势是非球对称的,那么使沿引力势长轴方向抛射出去的恒星在观测时刻具有最大速度且可能成为超高速星,而沿引力势短轴方向抛射出去的恒星的速度则被大大降低,且在观测时刻很难成为超高速星。

除新发现的 5 颗超高速星外, Brown 等人还发现了 10 颗被银河系束缚的超高速星候选体, 它们可能是从银心产生的另一种超高速星族, 并与广泛认同的超高速星是从银河系逃逸的恒星^[7]不一致。此外, Tillich 等人^[12] 2009 年发现的起源于银盘外边缘的超高速星虽然能够从银河系逃逸, 却并不是恒星与银心黑洞动力学作用的产物。这些超高速星的发现深化了人们关于超高速星的认识。超高速星在由千亿颗恒星组成的银河系内运动时, 速度、轨道及能否逃逸都受银河系引力势影响。目前银河系引力势场的测定仍有相当大的不确定性, 根据已有的观测人们已经提出了多种引力势模型, 超高速星搜寻领域常用的引力势包括 Gnedin 等人^[55] 的模型、薛香香等人^[52] 的模型、Kenyon 等人^[46] 的模型和 Allen 等人^[43] 的模型。它们都是三成分引力势模型, 由核球、银盘和暗物质晕组成。其中, Gnedin 等人的模型是最保守的引力势模型, 在他们的引力势下最难从银河系逃逸; 与其他模型不同, 薛香香等人的引力势模型中核球、银盘和暗物质晕都采用的是球对称模型, 因此在他们的引力势模型下最容易从银河系逃逸。

除 Brown 等人发现早期大质量超高速星外, Tillich 等人^[12] 也在 10 000 个包含着 BHB 星、BSS 和主序星的样本^[52] 中发现了一颗大质量超高速星 SDSS J013655.91+242546.0, 他们分别用欧洲南方天文台的新技术望远镜 (NTT) 和西班牙卡拉阿托 3.5 m 望远镜对其进行了观测, 并定量计算了它的大气参数、自转速度 ($250 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 和日心距离 ($(10.90 \pm 2.00) \text{ kpc}$), 测量结果显示它是一颗快速旋转的太阳金属丰度 A 型主序星。Tillich 等人使用 Allen 等人^[43] 的引力势模型计算了 SDSS J013655.91+242546.0 的轨道^[44] 及它在银盘上可能的起源区域。如果采用较低的暗物质晕的质量^[43, 52], 则 SDSS J013655.91+242546.0 是一颗能够逃逸的超高速星; 如果采用较高的暗物质晕的质量^[24], 则它是一颗能够被银河系引力势束缚的恒星。SDSS J013655.91+242546.0 在银盘上的起源区域位于银盘外边缘, 距离银心 12.5 kpc 到 18 kpc (见图 3 绿色区域), 它从这个区域运动到当前位置需要 $(12 \pm 1.3) \text{ Ma}$, 比它的主序年龄短。运动学实验结果排除了银心起源的可能, SDSS J013655.91+242546.0 成为一颗不是从银心诞生的超高速星。它从银盘上抛射出来需要很高的抛射速度 ($550 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), 因此银盘上双星中 Ia 型超新星爆炸机制^[48] (抛射速度不超过 $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 不能用来解释它的起源。此外, SDSS J013655.91+242546.0 的金属丰度高于该区域恒星金属丰度的平均值, 因此 Tillich 等人采用银河系及其矮星系的潮汐作用^[24] 解释它的起源。

3.2 晚型小质量超高速星的搜寻及起源研究

表 3 是 Kollmeier 等人发现的 6 个 F 和 G 型超高速星候选体的基本参数, 他们利用 SDSS 光谱数据进行过两次 F 和 G 型富金属超高速星搜寻工作^[13, 14]。第一次, 他们对 291 111 颗 SDSS 恒星中满足 $|V_G| \geq 350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件的样本进行了视向速度证认, 然后使用一系列颜色和运动学标准在这些样本中寻找富金属 F 和 G 型超高速星。他们没有找到富金属超高速星, 不过发现了表 3 中的 6 个贫金属超高速星候选体, 他们用 SDSS 自行数据计算了其中两个逃逸候选体的起源, 发现它们不大可能起源于银心。此外, Kollmeier 等人还估算出 F 和 G 型超高速星的数目不超过 O 和 B 型超高速星数目的 100 倍, 这可能说明银心环境更有利于大质量恒星的形成, 也可能说明低质量超高速星的喷射机制不如大质量超高速星的有效^[56]。第二次, Kollmeier 等人制定了更加严格而详细的选星方案, 但是他们仍然没有找到富

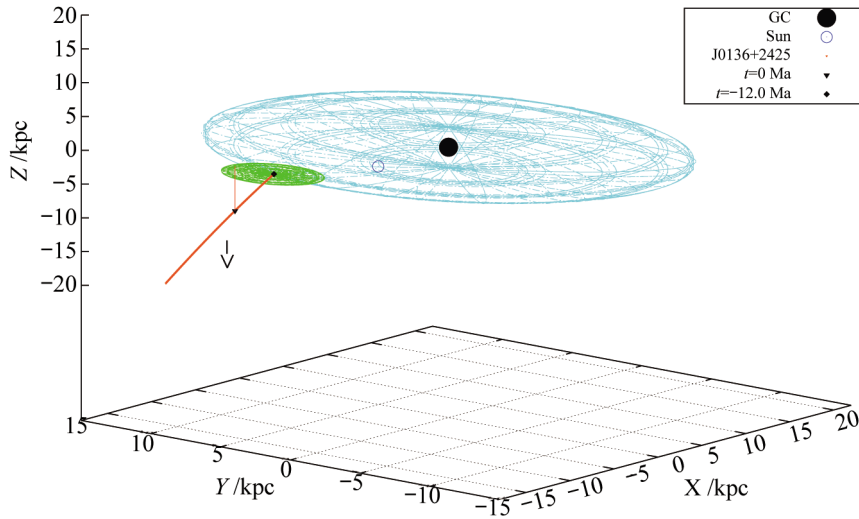


图 3 SDSS J013655.91+242546.0 的轨道及其在银盘上的起源区域 (绿色)

金属 F 和 G 型超高速星候选体, 根据此次结果他们再次估计出, 富金属老年 F 和 G 型超高速星的数目是大质量 B 型超高速星数目的 30 倍以下, 这要么意味着银心周围的环境确实适合大质量恒星的产生, 要么表示大质量恒星喷射机制的效率是小质量恒星的 5.5 倍。Kollmeier 等人两次都没有找到富金属 F 和 G 型超高速星可能有 3 个原因: (1) 银心附近的喷射机制很可能更容易喷射出大质量恒星, 也就是说低质量恒星的喷射速度低于 Kollmeier 等人选星条件中的 $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Kenyon 等人^[46]也曾预言过质量为 $1 M_{\odot}$ 的恒星的速度分布中, 速度大于 $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的恒星数量明显减少。(2) Pinsonneault 等人^[57]曾预言大质量恒星中双星的比例高 (接近 1), 而 Duquennoy 等人^[58]和 Lada 等人^[59]曾预言太阳邻域小质量恒星中双星比例低, 据此推断银心附近也有类似的情况, 因此典型的双星与银心大质量黑洞的动力学机制就更容易产生大质量的超高速星。(3) 如果放宽银心初始质量函数形式, 并假设银心更有利于大质量恒星的产生, 那么银心年老小质量恒星的数目就会减少, 起源于银心的年老小质量超高速星的数目也将会随之减少。

表 3 Kollmeier 发现的 6 颗年老贫金属超高速星候选体的基本参数

星名	$v_{\text{rf}}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	Type	m_g/mag	T_{eff}/K	$\lg(g)/\text{cgs}$	$[\text{Fe}/\text{H}]/\text{dex}$
SDSS J061118.63+642618.5	-412.3 ± 5.5	F	18.39	6 143	4.08	-1.27
SDSS J074557.31+181246.7	-409.0 ± 5.9	F	18.96	6 235	3.51	-1.73
SDSS J224052.56+011332.1	-407.1 ± 16.3	F	19.30	6 168	4.02	-1.37
SDSS J211321.02+103456.7	-404.4 ± 17.2	F	20.07	6 069	4.10	-1.91
SDSS J111107.85+585357.2	$+425.4\pm 3.1$	F	16.16	6 514	3.58	-1.77
SDSS J224740.09-004451.6	$+401.8\pm 13.1$	G	19.97	5 518	4.17	-1.22

注: v_{rf} 是相对于银心的视向速度, Type 是光谱型, m_g 是 g 波段星等, T_{eff} 、 $\lg(g)$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 分别是有效温度, 表面重力和金属丰度。

表 4 李荫碧等人发现的 13 颗超高速星候选体基本参数

星名 (SDSS)	编号 (mpHV)	$\mu_\alpha \cos(\delta)$ /mas·a ⁻¹	μ_δ /mas·a ⁻¹	v_\odot /km·s ⁻¹	v_{rf} /km·s ⁻¹	m_g /mag	T_{eff} /K	lg(g) /cgs	[Fe/H] /dex
J221853.48-004030.9	S1	-41.69	22.69	-432	-288	19.32	5604	3.82	-1.25
J221625.92+003555.4	S2	-21.12	0.82	-503	-354	19.00	6307	3.85	-1.44
J222620.74+004135.6	S3	17.92	3.19	170	317	18.86	6396	3.71	-1.09
J172915.20+431717.2	S4	3.52	26.12	-505	-315	17.11	6559	3.83	-2.00
J125210.66+300147.9	S5	-13.62	-12.06	365	382	19.31	5914	4.07	-1.78
J074817.52+360034.4	S6	-5.16	-16.66	335	313	19.37	6149	4.12	-1.21
J123237.34+165526.9	S7	7.94	-7.52	396	359	18.37	6271	3.77	-1.41
J121112.12+402029.5	S8	-14.12	-14.78	340	373	18.71	6216	3.84	-2.00
J172733.94+322459.1	S9	-9.13	-2.86	-567	-392	19.43	6308	3.81	-2.00
J171826.16+645745.8	S10	-10.18	0.53	189	384	19.28	6126	3.12	-1.79
J124814.84+284010.2	S11	-20.48	-16.90	361	371	18.77	5943	3.23	-1.75
J160912.29+345706.8	S12	-35.85	2.32	-435	-295	16.90	6478	3.62	-2.02
J203328.51+142607.0	S13	5.71	7.27	-492	-297	18.37	6579	3.76	-2.79

注: $\mu_\alpha \cos(\delta)$ 和 μ_δ 分别是赤经和赤纬方向的自行, v_\odot 和 v_{rf} 分别是相对于太阳和银心的视向速度, m_g 是 g 波段的视星等, T_{eff} 、lg(g) 和 [Fe/H] 分别是有效温度、表面重力和金属丰度。

表 4 是李荫碧等人^[15]在 SDSS DR7 恒星光谱数据中发现的 13 颗能够从银河系逃逸的超高速星候选体。他们首先用测光和光谱方法^[60]挑选出 130 775 颗 F 和 G 型主序星样本, 然后从中发现 3 颗在 Gnedin 等人^[55]和薛香香等人^[52]引力势模型下都能够从银河系逃逸的超高速星候选体 (mpHVS1、mpHVS2 和 mpHVS3), 以及 10 颗只能在薛香香等人引力势模型下逃逸的超高速星候选体 (mpHVS4—mpHVS13)。李荫碧等人计算了 13 颗候选体的轨道及它们在银盘上可能的诞生区域, 发现其中 7 个超高速星候选体很可能起源于银心或者银盘, 银心大质量黑洞瓦解双星以及银盘上致密恒星团中的多体作用可以解释它们的产生机制^[19-21, 61, 62]; 其余 6 个候选体即 mpHVS1、mpHVS2、mpHVS4、mpHVS6、mpHVS9 和 mpHVS13 则不大可能起源于银心或者银盘, 它们可能是 100 Ma 前在银河系潮汐作用下从矮星系剥落下来的星流中的恒星或剥落下来的单个恒星^[23, 24]。此外, mpHVS1 和 mpHVS2 也可能是 M31 或 M32 中心大质量黑洞瓦解双星产生的超高速星^[22], 因为它们从太阳一侧以约 500 km·s⁻¹ 速度向银河系靠近^[22]。李荫碧等人还分析了 13 个超高速星候选体是双星时, 双星轨道速度对它们的视向速度及空间总速度的影响。根据候选体的光谱特征, 它们可能有 3 种类型的伴星, 假设 3 种情况下双星轨道半长轴都是 0.1 AU。当伴星是质量为 1 M_\odot 的主序星或者质量为 3 M_\odot 的中子星^[63]时, 双星轨道速度对超高速星候选体的视向速度和空间速度的影响很小, 只有十几到几十 km·s⁻¹; 而当伴星是质量为 10 M_\odot 的黑洞时, 双星轨道速度对超高速星候选体的视向速度和空间速度影响很大, 甚至可以达到上百 km·s⁻¹。2011 年, 董若冰等人^[64]指出 SDSS 给出的自行误差比真实的自行误差小, 他们还给出一种计算恒星不同置信度水平自行的统计学模型。李荫碧等人采用他们的模型重新估算了各个候选体的自行值, 并利用新的自行测量值估算了自行不确定性对候选体空间总速度的影响, 发现用董若冰等人统计学模型对 13 个候选体的自行和空间总速度进行估算的值都减小, 且只有 mpHVS1 仍然能够在 Gnedin 等人^[55]和薛香香等人^[52]的引力势模型下逃逸, 有 10 个候选体

(mpHVS4—mpHVS13) 即使在薛香香等人的引力势模型下也不能从银河系逃逸, 由此可见候选体空间总速度受自行影响较大。

3.3 处于恒星演化晚期的 sdB 型超高速星的搜寻及起源研究

至此, 已经发现的超高速星中只有 US 708 处于恒星演化晚期。这类恒星的年龄很老, 是研究银河系引力势模型的有效工具, 但是由于它们的亮度太低, 只有少数这样的恒星被详细地研究过。鉴于此, Tillich 等人^[49]实施了一个搜寻 sdB 型超高速星项目, 他们用运动学和颜色条件从 SDSS DR6 的 300 000 光谱数据中人工挑选出 265 个 sdB 星候选体, 并从 2007 年开始对这些候选体进行观测。目前他们已经观测了其中 88 颗候选体, 并从中发现了两颗超高速星 SDSS J1644+4523 和 SDSS J1211+1437(如表 5 所示)。他们首先确定了这两颗星的大气参数、质量及视星等^[65], 接着用这些参数估计了它们的距离^[65](如表 5 所示), 最后他们采用 Allen 等人的银河系引力势模型^[43]计算了这两颗超高速星的轨道^[44]以及在银盘上可能的起源区域。SDSS J1644+452 的运动学实验表明, 在 Allen 引力势模型下, 它是一颗起源于银心的被银河系束缚的超高速星, 但是它的运行时间 (2.37 Ga) 远长于氦核燃烧持续的时间 (≈ 200 Ma), 这说明它从银心喷射出来后经过很长时间才演化到亚矮星阶段。Wilkinson 等人^[66]和 Sakamoto 等人^[67]认为暗物质晕的质量应该更大一些, 因此作者采用 Abadi 等人^[24]的银晕质量重新计算了 SDSS J1644+452 的轨道和运行时间, 结果它的起源地几乎没有变化, 但运行时间却大大缩短为 171 Ma (与热亚矮星的年龄一致), 所以采用较大的暗物质晕质量后, SDSS J1644+452 是一颗从银心抛射出来的 sdB 型超高速星。由于 Tillich 等人观测的 SDSS J1211+1437 的光谱范围太窄, 不适合测量大气参数, 他们就使用 SDSS 数据库中它的光谱测量了大气参数, 但由于 SDSS 光谱中没有包含对 $\lg(g)$ 敏感的巴尔末线, 因此它的表面重力的测量值不够准确。SDSS J1211+1437 的运动学实验表明它的起源地不在银河系内, 这有两种可能: (1) 这颗星确实并非起源于银心。(2) 由于它的表面重力被低估了 0.1 ~ 0.2 dex, 使得起源地发生了变化。如果把这颗星的表面重力增加 0.2 dex, 则它的起源地就位于银河系的外边缘处; 如果在使用引力势模型时增加暗物质晕的质量, 就可以得到一个更加靠近银盘的诞生地。

4 总结和展望

超高速星作为研究银心大质量黑洞、银河系暗物质晕的结构以及银河系引力势模型等问题的有力工具, 越来越受到人们的关注。近年天文学家在搜寻超高速星, 研究它们可能的产生机制以及利用超高速星样本研究银河系引力势模型等方面开展了很多工作。本文首先总结了最早发现的 3 颗超高速星的研究成果, 其次总结了系统搜寻早型大质量超高速星、晚型小质量超高速星以及处于恒星演化晚期的 sdB 型超高速星的研究成果。

从 2005 年发现第一颗超高速星到现在, 超高速星搜寻领域取得了很多重要的成果, 未来仍有许多需要开展的工作。第一, 超高速星的发现非常依赖自行和距离测量的精度, 因此, 更高精度自行和距离的测量是未来超高速星搜寻领域需要不断研究和解决的问题。第二, 对

表 5 Tillich 发现的两颗 sdB 型超高速星的基本参数

参数	SDSS J1644+4523	SDSS J1211+1437
V/mag	17.36 ± 0.02	17.87 ± 0.02
T_{eff}/K	32035 ± 350	32530 ± 580
$\lg(g)/\text{cgs}$	5.72 ± 0.07	5.64 ± 0.16
d/kpc	3.97 ± 0.19	5.56 ± 0.59
$\mu_{\delta}/\text{mas} \cdot \text{a}^{-1}$	-26.1 ± 3.3	-27.2 ± 1.4
$\mu_{\alpha} \cos(\delta)/\text{mas} \cdot \text{a}^{-1}$	$+4.7 \pm 2.8$	-12.1 ± 1.8
$\lg(\frac{N_{\text{He}}}{N_{\text{H}}})$	-2.9 ± 0.1	-2.9 ± 0.1
$v_{\text{GRF}}/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	503^{+94}_{-91}	592^{+132}_{-118}
$\frac{M}{M_{\odot}}$	0.47	0.47
$v_{\text{esc}}/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	529	509
$V_{\text{rot}} \sin(i)$	0	0

注: V 是 V 波段的视星等, T_{eff} 和 $\lg(g)$ 分别是有效温度和表面重力, d 是到太阳的距离, μ_{δ} 和 $\mu_{\alpha} \cos(\delta)$ 分别是赤经和赤纬方向的自行, v_{GRF} 是相对于银心的视向速度, v_{esc} 是采用 Allen 等人的银河系引力势模型^[43] 得到的两颗超高速星所在位置处的逃逸速度, $V_{\text{rot}} \sin(i)$ 是旋转速度。

已发现的超高速星候选体进行光谱证认也是很重要的工作, 通过多次观察可以解决很多目前尚不清楚的问题。比如它们是否是双星, 如果能够从中发现超高速双星, 将证明确实存在能够从银河系逃逸的超高速双星^[17, 39]。第三, 目前已经发现的超高速星及候选体以晚 B 型和 F 型恒星为主, 今后有可能在更广的颜色和距离范围内寻找和发现超高速星。第四, 利用在建的或者已经建成的望远镜获取数量更大的光谱数据, 并从中全面地搜寻各种类型的超高速星候选体。

利用郭守敬望远镜 (Guoshoujing Telescope, 即 LAMOST) 获取的恒星光谱数据, 国内天文工作者可以开展搜寻各种类型超高速星候选体的工作。LAMOST 是我国自主研发的中星仪式反射施密特望远镜, 它的最大特点是实现了光学望远镜大视场, 兼备大口径的突破; 此外它还是目前世界上光谱获取率最高的望远镜, 可同时观测 4000 个天体目标^[68]。LAMOST 计划 5 年内获取约 750 万颗恒星的光谱数据, 这些恒星中包括年老的贫金属星族 II 恒星, 如球状星团中的成员星、亚矮星、红巨星和天琴 RR 型变星等, 以及年轻的富金属星族 I 恒星, 如疏散星团中的成员星、早型 O 型和 B 型恒星等。因此, LAMOST 获取的海量恒星数据中包含着各类星族中处于不同演化阶段的各种光谱型的恒星光谱, 这将使我们有机会从中发现颜色和质量范围分布更广的超高速星候选体, 为解决银心质量函数分布等问题奠定坚实的基础。人们先后在 SDSS 数据约 37 万的恒星光谱数据中发现了 16 颗超高速星候选体, 据此可以粗略地估算出使用 LAMOST 光谱数据将发现上百颗超高速星候选体。可以预期, 如果 LAMOST 数据如期而至, 则 5 年内新发现超高速星候选体的数目可能会增加一个量级。

参考文献:

- [1] Hills J G. *Nature*, 1988, 331: 687
- [2] Yu Q, Tremaine S. *ApJ*, 2003, 599: 1129
- [3] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J, et al. *ApJ*, 2005, 622: L33
- [4] Hirsch H A, Heber U, O'Toole S J, et al. *A&A*, 2005, 444: L61
- [5] Edelmann H, Napiwotzki R, Heber U, et al. *ApJ*, 2005, 634: L181
- [6] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J, et al. *ApJ*, 2006, 640: L35
- [7] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J, et al. *ApJ*, 2006, 647: 303
- [8] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J, et al. *ApJ*, 2007, 660: 311
- [9] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J, et al. *ApJ*, 2007, 671: 1708
- [10] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J. *ApJ*, 2009, 690: 1639
- [11] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J. *ArXiv e-prints*, 2012, 1203: 3543
- [12] Tillich A, Przybilla N, Scholz R D, et al. *A&A*, 2009, 507: L37
- [13] Kollmeier J A, Gould A, Knapp G, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1543
- [14] Kollmeier J A, Gould A, Rockosi C, et al. *ApJ*, 2010, 723: 812
- [15] Li Y, Luo A, Zhao G, et al. *ApJ*, 2012, 744: L24
- [16] Zhang F, Lu Y, Yu Q. *ApJ*, 2010, 722: 1744
- [17] Lu Y, Yu Q, Lin D N C. *ApJ*, 2007, 666: L89
- [18] Yu Q, Madau P. *MNRAS*, 2007, 379: 1293
- [19] Blaauw A. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1961, 15: 265
- [20] Poveda A, Ruiz J, Allen C. *Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya*, 1967, 4: 860
- [21] Gvaramadze V V, Gualandris A. *MNRAS*, 2011, 410: 304
- [22] Sherwin B D, Loeb A, O'Leary R M. *MNRAS*, 2008, 386: 1179
- [23] Teyssier M, Johnston K V, Shara M M. *ApJ*, 2009, 707: L22
- [24] Abadi M G, Navarro J F, Steinmetz, M. *ApJ*, 2009, 691: L63
- [25] Yanny B, Newberg H J, Kent S, et al. *ApJ*, 2000, 540: 825
- [26] Wilhelm R, Beers T C, Gray, R O. *AJ*, 1999, 117: 2308
- [27] Kinman T D, Suntzeff N B, Kraft R P. *AJ*, 1994, 108: 1722
- [28] Clewley L, Warren S J, Hewett P C, et al. *MNRAS*, 2002, 337: 87
- [29] Brown W R, Allende Prieto C, Beers T C, et al. *AJ*, 2003, 126: 1362
- [30] Schaller G, Schaerer D, Meynet G, et al. *A&AS*, 1992, 96: 269
- [31] Kenyon S J, Hartmann L. *ApJS*, 1995, 101: 117
- [32] Wakker B P, van Woerden H. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1997, 35: 217
- [33] Putman M E, de Heij V, Staveley-Smith L, et al. *AJ*, 2002, 123: 873
- [34] Leonard P J T. *ASP Conf. Ser.*45, 1993, 45: 360
- [35] Smith J A, Tucker D L, Kent S, et al. *AJ*, 2002, 123: 2121
- [36] Dorman B, Rood R T, O'Connell R W. *ApJ*, 1993, 419: 596
- [37] Napiwotzki R, Karl C A, Lisker T, et al. *Ap&SS*, 2004, 291: 321
- [38] Han Z, Podsiadlowski Ph, Maxted P F L, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 669
- [39] Perets H B. *ApJ*, 2009, 698: 1330
- [40] Justham S, Wolf C, Podsiadlowski Ph, Han Zh. *A&A*, 2009, 493: 1081
- [41] Wang B, Han Z. *A&A*, 2009, 508: L27
- [42] Ramspeck M, Heber U, Edelmann H. *A&A*, 2001, 379: 235
- [43] Allen C, Santillan A. *Rev. Mex. Astron. Astrofis*, 1991, 22: 255
- [44] Odenkirchen M, Brosche P. *Astron. Nachr.*, 1992, 313: 69
- [45] Brown W R, Anderson J, Gnedin O Y, et al. *ApJ*, 2010, 719: L23
- [46] Kenyon S J, Bromley B C, Geller M J, et al. *ApJ*, 2008, 680: 312
- [47] Bonanos A Z, López-Morales M, Hunter I, et al. *ApJ*, 2008, 675: L77

- [48] Przybilla N, Nieva M F, Heber U, et al. *A&A*, 2008, 480: L37
- [49] Tillich A, Geier S, Heber U, et al. *Ap&SS*, 2010, 329: 69
- [50] Gnedin O Y, Brown W R, Geller M J, et al. *ApJ*, 2010, 720: L108
- [51] Przybilla N, Nieva M F, Tillich A, et al. *A&A*, 2008, 488: L51
- [52] Xue X X, Rix H W, Zhao G, et al. *ApJ*, 2008, 684: 1143
- [53] Przybilla N, Tillich A, Heber U, et al. *ApJ*, 2010, 718: 37
- [54] Lu Y, Zhang F, Yu Q. *ApJ*, 2010, 709: 1356
- [55] Gnedin O Y, Gould A, Miralda-Escudé J, et al. *ApJ*, 2005, 634: 344
- [56] Perets H B, Hopman C, Alexander T. *ApJ*, 2007, 656: 709
- [57] Pinsonneault M H, Stanek K Z. *ApJ*, 2006, 639: L67
- [58] Duquennoy A, Mayor M. *A&A*, 1991, 248: 485
- [59] Lada C J. *ApJ*, 2006, 640: L63
- [60] Ivezić Ž, Sesar B, Jurić M, et al. *ApJ*, 2008, 684: 287
- [61] Leonard P J T. *AJ*, 1991, 101: 562
- [62] Gvaramadze V V, Gualandris A, Portegies Z S. *MNRAS*, 2009, 396: 570
- [63] Kiziltan B, Kottas A, Thorsett S E. *arXiv e-print*, 2010, 1011: 4291v1
- [64] Dong R B, Gunn J, Knapp G, et al. *AJ*, 2011, 142: 116
- [65] Jordi K, Grebel E K, Ammon K, et al. *A&A*, 2006, 460: 339
- [66] Wilkinson M I, Evans N W. *MNRAS*, 1999, 310: 645
- [67] Sakamoto T, Chiba M, Beers T C. *A&A*, 2003, 397: 899
- [68] Zhao G, Chen Y Q, Shi J R, et al. *ChJAA*, 2006, 6: 265

Research Progress on Searching for Hyper-velocity Stars

LI Yin-bi^{1,2}, LUO A-li¹, ZHAO Gang¹

(1. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hyper-velocity stars are believed to be ejected out from the Galactic center through dynamical interactions of (binary) stars with the central super-massive black hole(s), and are capable of escaping from the Galaxy. The discovery of hyper-velocity stars is a powerful proof of the super-mass black hole existing in the Galactic center. So far, 18 unbound hyper-velocity stars have been found, with more hyper-velocity stars to be uncovered in future, they can serve as useful tool to investigate the structure of the galaxy, such as the shape and orientation of Galactic halo, the Galactic potential model and the initial mass function in the Galactic center.

In this paper, we review the major progress in the field of searching for the hyper-velocity stars. The first three hyper-velocity stars were discovered serendipitously by Brown, Hirsch, Edelman and their cooperators in the year 2005. These stars were found in three different spectroscopic surveys of blue stars in the Galactic halo. Their spectra, kinematics

and possible originations have been extensively analyzed. Shortly after the discovery of the first three, many astronomers began to search for more hyper-velocity stars using the massive photometric and spectroscopic data. Brown and his collaborators found 15 massive blue unbound hyper-velocity stars in the photometric data of DR4, DR5, DR6, DR7, and DR8 of the SDSS, within which is probably a BHB star. Tillich and his cooperators found one A type main-sequence hyper-velocity stars from 10 000 halo stars, which is thought to originate from the edge of the Galactic disk rather than the Galactic center. Kollmeier and her collaborators proposed to search for low-mass metal-rich hyper-velocity stars in the SDSS spectroscopic data, and finally came up with 6 metal-poor F and G type hyper-velocity stars candidates. Li and her cooperators also tried to seek low-mass hyper-velocity stars in the SDSS spectroscopic data, and finally found 13 low-mass metal-poor F and G type hyper-velocity star candidates from the DR7. Interestingly, among these 13 candidates, 6 are probably not originated from the Galactic center or Galactic disk, but from the tidal break of dwarf galaxies of the Galaxy or the center of M31 or M32. If all those low-mass hyper-velocity star candidates are identified by future multiple observations, they will be very useful in our understanding of the potential well of the Galactic center. Apart from these, Tillich and his colleague did find two evolutionary sdB hyper-velocity stars through the HYPER-MUCHFUSS project, which aims to find sdB type hyper-velocity stars and sdB stars with a massive companion invisible in optic band.

Key words: Hyper-velocity star; spectroscopic surveys; Galactic halo