

LAMOST 恒星光谱巡天与银河系恒星晕研究*

刘超 邓李才[†]

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

2014-12-30收到

[†] email: licai@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150403

The LAMOST stellar spectroscopic survey and the Galactic halo

LIU Chao DENG Li-Cai[†]

(The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

摘要 星系的形成和演化问题是当今天体物理的前沿和核心。由于身居其中,而且可以对单个的恒星进行仔细的观测,银河系因此成为了研究星系的形成和演化乃至宇宙学的一个极重要样本。银河系的晕(包括恒星晕和暗物质晕)被证实具有非常复杂的结构,其中所蕴藏的信息使人们有可能揭示银河系的结构、形成和丰富的演化历史,其中的一些特殊天体可以用来探求银河系中央黑洞等当今天体物理的热点问题。LAMOST银河系恒星低分辨光谱巡天是迄今为止最大的同类观测项目,其形成的数据库非常适宜人们开展许多银河系结构和演化方面的工作。文章介绍了LAMOST银河系巡天在银晕和相关结构上正在开展的研究工作,并展示了一些早期的科学研究成果。

关键词 天体物理, 银河系, 银晕, 光谱巡天

Abstract The formation and evolution of galaxies is an extremely important and fundamental question in modern astrophysics. Among the galaxies, the Milky Way is a very special sample not only because we live in it, but also because it is the only one in which we can carefully and individually observe its member stars. It has been confirmed that the Galactic halo, including both the stellar spheroid and the dark matter halo, contains fairly complicated structures, from which the overall shape, formation, and evolutionary history of our Galaxy can be unveiled. Moreover, some very rare and special stars in the Milky Way can be used as tracers to indirectly detect the core region of the Galaxy around the central super-massive black hole, which is also a hot topic of astrophysics. The LAMOST survey of the Milky Way will collect millions of stellar spectra at low wavelength resolution, making it the largest of such projects throughout the world. Its data base is very suitable for the study of the structure and evolution of the Milky Way. In this article, we report our on-going studies on the Galactic halo with LAMOST data, and present some early scientific results.

Keywords astrophysics, The Milky Way, Galactic halo, spectroscopic survey

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB845700)、中国科学院
战略性先导科技专项(B类)(批准号: XDB09000000)资助项目

1 银河系的基本结构

一般认为, 银河系是一个包含上千亿颗恒星的盘星系(disk galaxy)。盘星系的绝大多数恒星都集中在一个很扁的圆盘上(称为星系盘(galactic disk)), 只有非常少的恒星弥散地分布在一个包裹着星系盘的近似球型的空间内, 形成恒星晕(stellar halo)。现代宇宙学理论认为, 宇宙绝大多数的物质是暗物质, 构成恒星等发光物质的重子大约只有暗物质的五分之一。这些暗物质不仅占据空旷的宇宙空间, 还包裹着绝大多数星系, 构成暗物质晕(dark matter halo)。暗物质晕分布在比恒星晕更大的一个近似于球型的空间内。在暗物质晕的内部和周围, 还可能有一些较小尺寸的暗物质团块, 称为暗物质子晕(subhaloes), 有的还会在其中包裹着一个高质量的矮星系(dwarf galaxy)。

在天体物理领域里, 最基本的问题就是星系的结构是怎样的, 以及星系是如何演化成今天这样的结构的。实际上, 一个星系的形成和演化与暗物质的分布结构是密不可分的。基于冷暗物质宇宙模型(称为 Λ CDM模型)建立的星系形成理论认为, 像银河系这样的盘星系的形成主要受到两个机制的影响: 一个是重子物质在初始状态和暗物质具有类似的空间分布, 但是由于重子物质具有耗散性, 因此会通过辐射损失能量, 从而导致内压不足以抵抗自身引力, 进而产生引力主导的坍缩。在这个过程中, 重子物质的角动量并没有损失, 因此, 随着坍缩至较小半径, 转动速度会逐渐变快, 从而形成一个扁平的旋转气体盘。恒星在其中诞生并形成今天看到的恒星盘^[1, 2]。另一个机制是, 星系晕外围的暗物质子晕会受到中心晕的潮汐力作用, 逐渐瓦解, 最终并合到中心晕中, 从而导致中心晕质量随时间而增长, 最终形成当前尺度的星系暗晕^[3]。

银河系恒星晕形成则有两类不同的解释。坍缩模型认为, 气体还没有坍缩成气体盘之前就已经触发了恒星形成, 这类恒星缺少足够的角动量, 因此整体上没有绕星系中心的转动, 最终形成恒星晕^[4]。这一过程是由外向内的, 因此外部

的晕星先形成, 内部的后形成。这种解释在上世纪60—70年代盛行一时, 但随后Searle和Zinn发现球状星团的金属丰度同银心距没有相关性^[5], 这无法用坍缩模型进行解释, 从而提出并合模型。并合模型认为, 部分暗物质子晕在并合之前就已经形成了矮星系, 这些恒星系统随子晕并合瓦解, 其成员星经过剧烈相混合过程, 不再呈现空间成团特征, 而弥散地分布在球状空间内, 最终形成现在的恒星晕。90年代以后, 并合模型得到了冷暗物质宇宙学模型的支持, 而后者在大尺度上取得的空前成功, 促使人们普遍接受了恒星晕的并合模型。

下面将综述近年来银晕研究的现状, 提出LAMOST巡天数据可以在哪些方面取得重要进展。

2 当前的研究焦点问题

2.1 恒星晕的整体结构

虽然我们无法直接探测到暗物质晕的分布, 但是我们可以精确地测定恒星晕的分布轮廓(如图1所示), 这对理解晕的形成同样有很大帮助。通常认为, 银河系的恒星晕的数密度从内向外

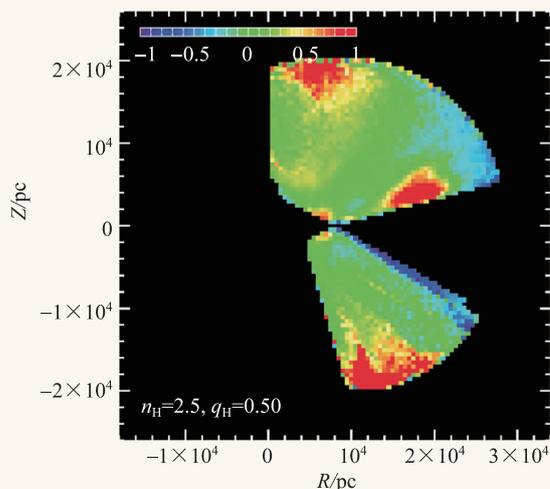


图1 银河系晕的计数模型^[6](图中的红色区域是过密度区, 显示这些位置上存在更多的恒星。上端的过密度区即为室女座过密度区。图中横坐标 R 为银心距, 纵坐标 Z 为距离银盘的高度, n_H 为恒星数密度的幂律轮廓的幂指数, q_H 为幂律轮廓的长短轴比)

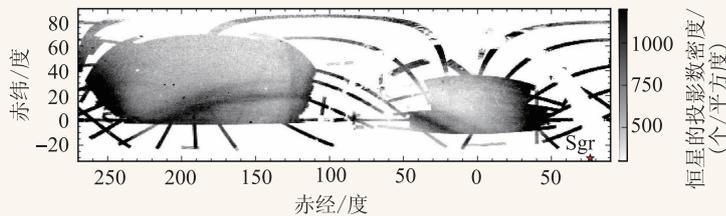


图2 人马座星流在天空中的分布(深色的弧形结构自左向右出现在图的下方, 纵横坐标分别为天球坐标系的赤经和赤纬, 图右侧的灰度表示恒星的投影数密度)^[21]

2.2 恒星晕中的潮汐子结构

冷暗物质宇宙模型预言了主星系晕周围总是存在大量不同质量的子晕, 这些子晕在潮汐力作用下会发生瓦解, 并最终并入主晕中。与此同时, 部分暗物质子晕所包裹的矮星系也会瓦解并最终并入恒星晕中。潮汐瓦解过程往往要持

以幂律下降。很多研究表明, 它是一个幂指数约为 -2 — -3 的幂律轮廓^[6-9]。但是绝大多数基于天琴座RR变星(一类金属丰度比较低的脉动变星, 大量存在于恒星晕中)和蓝水平分支星(一类金属丰度比较低的恒星, 处于中心氦燃烧阶段, 大量分布于恒星晕中)的测量结果显示, 它是一个断幂指数(broken power law)的轮廓。Watkins等人^[10]和Deason等人^[11]分别使用天琴座RR变星测量恒星晕的数密度轮廓, 发现大约在银心距23—27 kpc(即千秒差距, 距离单位, 1 pc=3.26光年)之内, 幂指数约为 -2.3 — -2.4 ; 在这个半径之外, 数密度轮廓突然快速下降, 幂指数变为 -4.5 — -4.6 。

断幂律轮廓形成的原因大约有两种: 一种唯像地认为, 这是由于银晕分为内晕和外晕两个成分^[12]; 另一种解释是通过和数值模拟进行比较, 认为这是由于银晕中存在的尚未瓦解的潮汐结构而造成的^[11]。为了澄清这个问题, 还需要在其他类型恒星中也探测到类似结构, 因此我们需要在更大样本、更大空间范围内进行深入的跟踪研究。

此外, 也有研究认为, 银河系的恒星晕形状并非是球型或扁球形, 而可能是一个三轴椭球体^[13]。实际上, Newberg等人^[14, 15]和Juric等人^[6]揭示了在室女座(Virgo)方向, 恒星晕存在过密度区, 这到底是因为三轴结构的投影效果, 还是由于在这个实现方向上存在一个弥散的矮星系或者潮汐子结构, 目前还不清楚。这需要更多的光谱数据研究室女座过密度区恒星的运动和化学性质, 以提供更多星族证据。

续数十亿年, 因此比较容易在河外星系中观察到这一现象。例如McConnachi等人^[16]通过PAndAS巡天项目, 于2009年在仙女座星系(M31)的引力势范围内发现数个巨大的潮汐星流。Martinez-Delgado等人^[17]于2009年在几个近邻的盘星系中也发现了类似星流结构。银河系中的潮汐星流最早是由Majewski等人^[18]于2003年在2MASS星表(一个全天近红外巡天项目, 全称为Two Micron All Sky Survey)的M巨星中发现的, 即人马座(Sagittarius)星流(见图2)。SDSS(Sloan Digital Sky Survey)测光和光谱巡天提供了大量的观测证据, 比较清晰地描述了人马座星流和人马座矮星系之间的物理联系, 并在空间很多位置上确定了星流的整体运动速度^[14, 19-23]。但是仍然存在大量令人迷惑的问题, 例如在SDSS测光图像中显示, 人马座星流的前导星流存在分叉, 两个强度不等的分支并不在同一个距离上, 其运动速度也不一样^[20, 23]。目前仍不清楚这两个分支是否都属于人马座星流^[24]。另外, 由于受到银盘的影响, 靠近反银心方向的部分并未被有效观测, 因而人马座星流的整体运动还无法重构出来, 依旧无法反推其瓦解的详尽过程。除了最为明显的人马座星流, 银河系晕中还发现了十几条潮汐星流, 但是绝大多数都没有发现其来源。

2.3 星系考古学

所谓星系考古学(Galactic Archaeology)就是通过研究恒星中存有的动力学不变量和化学元素的丰度(即恒星大气中不同化学元素的质量比例)推

测其起源,进而勾画出整个星系的演化历史来。这个过程同考古学很相似,因而得名。依据冷暗物质宇宙模型的预言,银晕中曾经发生过大量的矮星系并合后瓦解的事件,Bell等人^[8]根据观测建立的模型认为,绝大多数晕族恒星都曾经是矮星系的成员,经过并合后并入到银河系的晕中来。前一节讲到的潮汐子结构仅仅是正在发生的并合过程,实际上可能在银河系100多亿年的历史中存在大量这样的矮星系并合事件,它们并合进来的成员星经过几个动力学时标(动力学时标是指恒星从银河系一边运动到另一边需要的大致时间),由于持续受到银河系引力势的作用,最终彻底弛豫(弛豫是指恒星经过多种动力学活动以后,已经“彻底忘记”了其初始的轨道特征),以致今天我们无法从空间上将它们识别出来。但是,幸运的是,动力学理论证明,尽管我们不能从空间位置中将这曾经是矮星系的成员星辨认出来,它们在积分不变量(一些不随时间变化的动力学积分量,例如,在一个轴对称的引力势中,恒星轨道的总能量和它的轨道角动量在垂直方向上的分量都是积分不变量)的空间中仍然保存着矮星系以前的轨道特征信息。这为我们辨认这些早期瓦解的矮星系碎片提供了可能性。Helmi和White于1999年首先在太阳临近的恒星中找到了这样的信号^[25],随后多个团队都找到了类似的矮星系吸积碎片^[26]。

此外,我们还可以通过化学元素丰度来寻找吸积并合的遗迹。恒星中持续进行的热核反应会不断将H, He等轻元素转换成一直到铁原子的更重的元素。超新星在瞬间爆炸的极端环境中,以及渐进巨星支(AGB星)中都会进一步合成比铁更重的金属元素。这些重元素会跟随超新星、大质量星的星风以及AGB星等抛射出的物质进入到星际气体中,随着下一代恒星的形成,固化到更年轻一代的恒星中。恒星如此一代一代不断地增加金属元素丰度,由于恒星形成历史不同,不同矮星系最终会形成完全不一样的元素丰度分布,这为我们辨认矮星系吸积遗迹提供了便利。通常我们使用铁的丰度来代表所有金属的丰度,同时

O, Ca, Mg, Al, Si, Ti等所谓 α 元素也是很重要的丰度参考量。最近的研究表明,银晕似乎存在内晕和外晕,内晕的金属丰度要高于外晕的^[12]。比较可信的解释认为,内晕是由较早期的并合事件形成的,外晕则是由最近的并合事件形成的,因而存在不同的金属丰度。

另外,很多研究发现,银河系晕星的 α 元素丰度高于现存的矮星系的丰度^[27]。这似乎表明,要么银晕恒星不是矮星系并合产生的,从而和冷暗物质宇宙模型相矛盾;要么早期并合进来的矮星系和今天仍然存在的矮星系有着不一样的恒星形成历史,因而具有不同的 α 元素丰度。但是后者还需要更加坚实的观测证据。

2.4 使用晕族恒星估计银河系暗物质晕的质量

由于我们不能直接观测到暗物质,所以需要使用晕中的恒星作为探针测量暗物质贡献的引力势,由此间接地描绘暗物质晕的结构。引力势和质量是通过泊松方程联系起来的,因而得到引力势以后就可以推算出它们的质量分布。在实际观测中,很少直接使用泊松方程,因为引力势在其中表现为二阶导数形式,对观测数据求导数会带来非常大的计算误差。因此,实际操作中常估算引力势的一阶导数,即引力在某个方向上的分量,再通过应用不同质量分布模型给出质量分布的估计。

对引力的估计有很多种方法,比较常用的是类似统计物理的方法:对于一个稳定的恒星系统,无碰撞玻尔兹曼方程是成立的。更加实用的形式是对玻尔兹曼方程的各个动量分量积分以后得到的金斯方程组。金斯方程将观测量——恒星的分布和速度分布同引力联系起来。因此,通过恒星晕的分布和运动可以约束暗物质晕的质量分布。具体到暗物质晕的测量,一般需要假设恒星晕中的恒星是稳定的,即它们在相空间的分布函数是不随时间变化的。这样我们就可以通过测量晕星沿径向的数密度分布和在不同银心距处的速度弥散来估算 $r\partial\Phi/\partial r$ 。这个量反映了引力沿

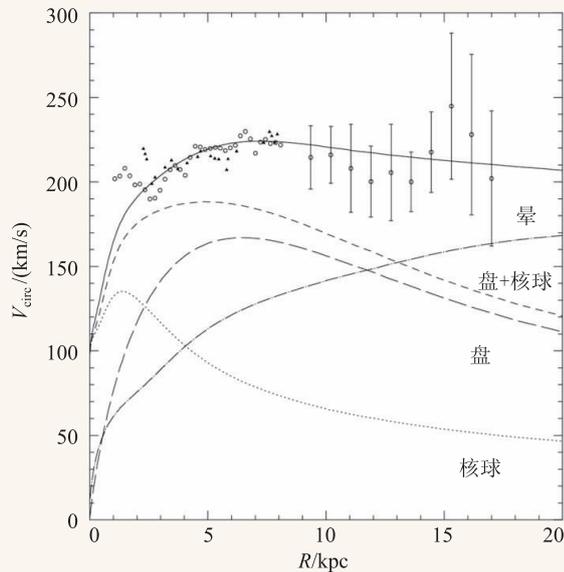


图3 银河系的旋转曲线(图中横坐标 R 为银心距,纵坐标 V_{circ} 为银河系的圆周速度,空心圆和三角是观测数据,实线是模型给出的旋转曲线,点线、长虚线、点虚线分别是核球、盘、晕的贡献,短虚线是核球和盘合在一起的贡献)^[29]

径向的分量,它的平方根也被称作圆周速度,因为它正好就是一颗恒星在这个半径 r 处绕星系中心做圆周运动的速度。不同半径处的圆周速度构成了星系的旋转曲线(不要被“旋转”误导,这只是一般习惯叫法,实际上一般认为恒星晕整体并不绕银心旋转),通过与不同质量分布的理论旋转曲线模型进行比较,最终确定银河系暗物质晕的质量分布,进而通过对体积分求得它的总质量(如图3所示)。

尽管这个估算对观测数据质量和动力学模型都有较高要求,但还是不断有更新的工作给出银河系引力势的不同测量。Xue等人^[28]使用SDSS巡天得到的2400颗蓝水平分支星,对银河系的总体质量进行了估计,得到 $1 \times 10^{12} M_{\odot}$ (M_{\odot} 为太阳质量,通常用来作为星系尺度天体的质量单位),这同Kylpin等人^[29]所做的估计非常接近(见图3)。但是Bovy和Rix^[30]的估计结果倾向于更小的质量,约为 $0.8 \times 10^{12} M_{\odot}$,而Kalberla等人^[31]认为质量为 $1.8 \times 10^{12} M_{\odot}$ 。可见,尽管很多人做了大量工作,但是银河系的总质量还远远没有得到精确、一致的测定。

除了通过大量晕星直接测量旋转曲线,即测量星系在径向方向的引力,也有很多方法通过观测恒星垂直方向上的分布和速度弥散测量太阳附近垂直于银盘方向的引力,从而测定太阳附近暗物质的密度。在对暗物质晕的形状做出假设的情况下,可以仅仅通过太阳附近这一个点的测量而得到银河系的整体质量。这个方法首先由Oort在1932年使用,并由Kuijken和Gilmore^[32]做出改进,但是直到1989年依巴谷(Hipparcos)天体测量卫星获得大量邻近恒星的距离和自行(恒星沿天球的切向运动)以后,较为可靠的测量才成为可能。Holmberg和Flynn^[33, 34], Garbari等人^[35], Bovy和Trimaine^[36], Zhang等人^[37], Moni Bidin等人^[38], Smith等人^[39], Piffl等人^[40]以及Bienayme等人^[41]分别测量了太阳附近的暗物质密度。但是这些结果也远未达到一致。Read^[42]最近给出了一份非常详尽的综述,将历史上的几乎所有测量结果画在一张图上(见图4)。产生如此不一致的测量结果的原因,一方面是由于观测数据本身还缺乏足够的完备度,另一方面也是因为不同工作分别对太阳附近的引力势和恒星运动学特征作出了不同的假设,并基于此建立了不同的动力学模型,而这些假设和模型之间还不能做到自洽。

2.5 暗物质晕的子结构

根据冷暗物质模型的预测,暗物质晕可能并不是一个光滑的结构,而是存在大量的没有瓦解或者没有弛豫的子结构。然而,对暗物质晕的子结构的探测非常困难。Xue等人^[43]尝试使用BHB星的位置和速度信息建立了相关函数,发现晕中存在大量小尺度结构,这种小尺度结构在外晕中似乎更加丰富。此外,Kafle等人^[44]以及Deason等人^[45]的工作发现,晕星的速度椭球在一些半径处发生了形状的变化。一般认为,接近球形的暗物质晕会使得处于平衡态的晕星的速度椭球也近似成球形,但是Kafle等人^[44]发现在半径为15 kpc处,Deason等人^[45]发现在半径为24 kpc处,速度椭球会沿着切线方向拉长。这可能是由于暗物质

晕中不均匀的质量分布造成的，也可能同这些晕星的不同起源有关。另外，Liu 等人^[46](见图 5)还发现在半径 12 kpc 处还有可能存在一个暗物质环。无论在理论上还是在观测上，这些问题都还远远没有得到解决。

2.6 超高速恒星

通常，银河系晕中的恒星在银河系的引力束缚下，绕银河系中心做近似的开普勒运动。受恒星的初始状态和银河系的物质分布等多种因素的影响，恒星的轨道可呈现纷繁的形态，但均是束缚轨道。在恒星运动学分类中，相对太阳近邻恒星平均运动速度 65—100 km/s 的恒星就被认为是高速恒星，我们研究的恒星晕中的恒星是恒星运动学分类中高速恒星最为普遍的一种，这也是判别太阳近邻恒星是盘星还是晕星的条件之一。超高速恒星(hypervelocity stars, 缩写为 HVS)具有的速度大大地超过了银河系恒星运动学允许的可能值，形成了开放的轨道而将逃逸出银河系引力的束缚。通常，这类恒星被解释为银河系中央黑洞与双星(或三星)系统发生相互作用，

其中一颗恒星被黑洞吞噬，而双星(或三星)系统中另外的恒星(或双星)以很高的速度被踢出，并

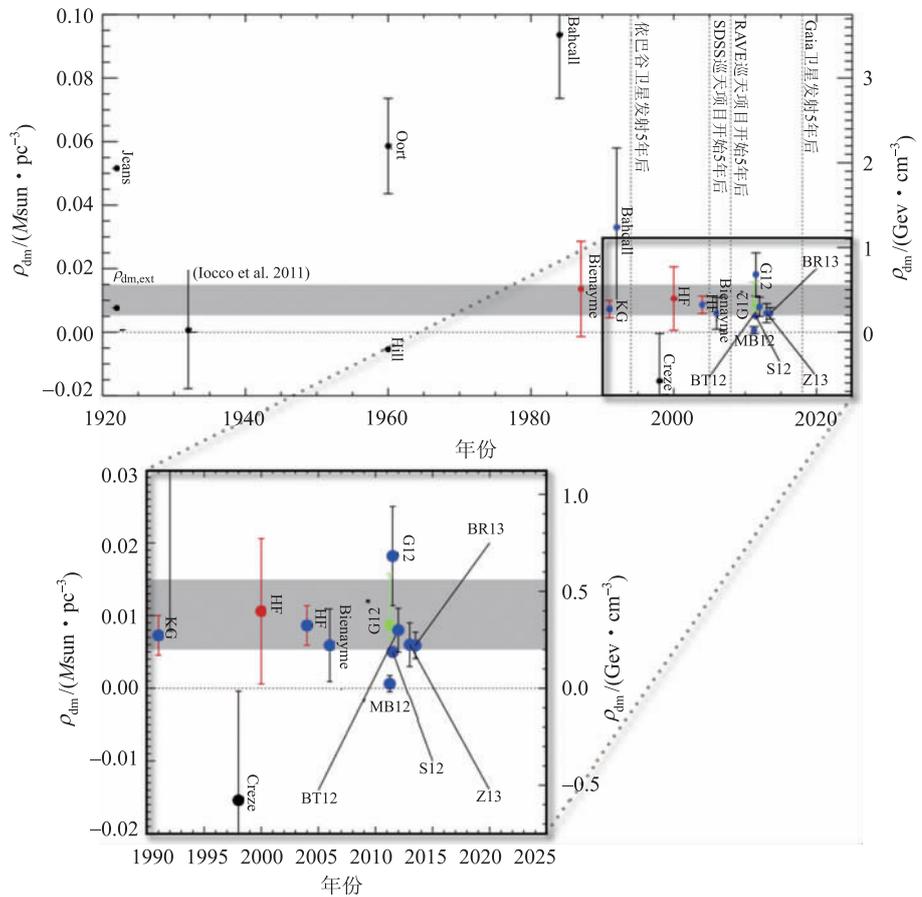


图4 历史上对太阳附近暗物质测量的各种结果汇总(图中横坐标为研究结果发表年份，纵坐标是太阳本地暗物质密度，左边以天文学常用单位“太阳质量每立方秒差距”标出，右边以物理学常用单位“十亿电子伏特每立方厘米”标出，二者等价。图中符号表示各个年代测量的暗物质密度数值，旁边的字母和数字代表作者名字缩写和年代。可以看到，不同研究得到的结果弥散非常大)^[42]

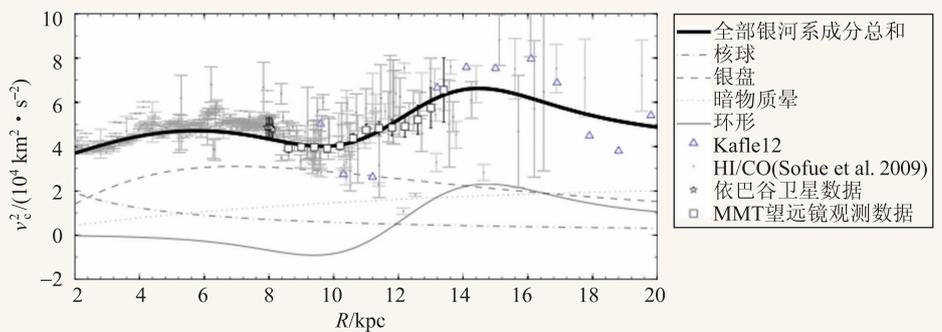


图5 银河系旋转曲线在 12 kpc 处出现一个较大的波动，暗示此处存在较大质量的暗物质环(横坐标 R 是银心距，纵坐标 v_c^2 是旋转曲线的平方形式。粗实线是银河系所有成分对旋转曲线的贡献总和，点虚线、虚线、点线和细实线分别是核球、银盘、暗物质晕和暗物质环的贡献。方块是使用 MMT 望远镜测量的结果，五角星是依巴谷卫星测量结果，灰色点是射电望远镜通过中性氢和一氧化碳测量的旋转曲线结果^[47]，蓝色三角形来自 Kafle 等人^[44]的工作)

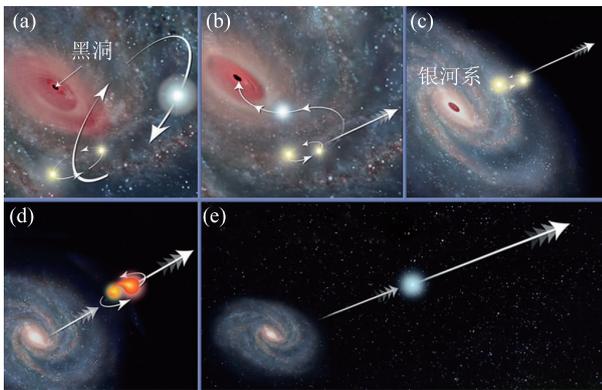


图6 银河系超高速恒星(HVS)形成机制之一示意图(这是通过三星系统形成超高速恒星过程的艺术想象) (a)三星系统由较紧密的双星和一个相对松散的第三体组成,它们均为小质量恒星;(b)三星系统与银河系中央黑洞发生动力学相互作用;(c)在与银河系中央黑洞发生动力学相互作用后,第三体被中央黑洞吞噬,而紧密的双星系统被踢出,具有极高的速度;(d)和(e)表示这个双星在逃逸的过程中因为自身动力学演化而并合,形成一颗蓝色的恒星

被观测发现为HVS。这个图像最早是被理论研究所预言^[47],人们甚至利用已有的知识进一步计算了这类恒星在银河系的发生率大概为每十万年一颗^[48]。其后不久,第一个HVS就被Brown等人于2005年发现了^[49]。

图6显示的是一个三星系统受银河系中央超大质量黑洞潮汐作用,三星中的紧密双星被踢出,其后在动力学演化过程中合并成一颗蓝色的恒星,从银河系引力势阱逃逸的想象图景。银河系中的HVS可能也存在其他来源,比如Ia型超新星爆发时,其伴星会突然失去束缚力而被高速踢出^[50],成为银河系中运动性质非常特殊的恒星。其轨道不再与银河系中心相关,而且它们也可能具有接近或超过逃逸银河系的速度。银河系在吸积矮星系的动力学过程中,也可能产生运动性质极为特殊的恒星。

一般而言,银河系恒星晕由老年的小质量恒星主导,其测光性质基本上都偏红,即小质量的红色矮星或巨星。银河系恒星晕中观测到的早期恒星(蓝色)非常罕见,并难以用常规的银河系物理图像进行解释。这种例外就是判断HVS候选体最直接的标准。因为银河系测光可以相对容易地开展,从测光上搜寻候选体就成为发现HVS的最

有力手段。发现HVS和认证需要光谱观测,而大规模的恒星光谱巡天是发现和确认此类目标的最佳手段。这也是SDSS在此项研究中取得巨大成功的原因,现有的超高速恒星绝大部分是SDSS巡天发现的。

LAMOST银河系研究计划是迄今最大规模的恒星光谱巡天。截至本文完稿,已完成300多万恒星光谱观测,在HVS的搜寻工作上已经显示出强大的能力。2014年天文学家利用LAMOST发现了其首颗HVS,并被证实为离我们最近的此类天体^[51]。因为LAMOST银河系巡天业已成为迄今最大的恒星低分辨光谱库,我们有理由相信,其中存在更多的HVS和其他类型的高速恒星目标等待我们去发掘。在首个LAMOST HVS发现后,另外一批候选体也被发现,其中的12颗很有可能被证实^[52]。LAMOST的这些发现极大地丰富了现有的样本,必将在用HVS作为探针来研究银河系中央黑洞的物理性质的过程中起到重要作用。

3 展望

3.1 LAMOST巡天中的晕星样本

LAMOST巡天数据的极限星等为17.8星等,因此只能观测到银晕中的巨星。银晕中的矮星太暗,很难被LAMOST观测到。LAMOST最终将获得的数百万颗恒星光谱中有大约数万颗是位于恒星晕中的巨星,这为我们研究银晕提供了宝贵的样本。尽管它们可能绝大多数集中在距离太阳40 kpc以内的范围里,但是由于LAMOST巡天的采样数目非常高,因此在较小的体积内有更高的采样率,这是LAMOST巡天研究银晕的优势所在。

3.2 利用LAMOST巡天研究银晕

LAMOST的巡天数据中很多类型的恒星都可以用于银河系晕的研究。首先,利用LAMOST五年巡天得到的数据,我们将得到3—5万颗晕族巨星的位置、距离、视向速度、金属丰度等信息,

这些将帮助我们重新构造更加清晰的银晕图像。我们已经挑选出比较纯净的晕族巨星样本。Liu 等人^[53]通过证认谱线特征,从LAMOST DR1星表中证认出约300000颗巨星,其中大多数都是盘族巨星。当通过金属丰度选取以后,我们得到约7000颗晕族巨星,其中绝大多数都分布在40 kpc之内,少量可以达到80 kpc之远。随着巡天的继续进行,这个样本还会有成倍地增长,最终成为晕族恒星的最高光谱采样。这个晕族巨星样本是我们开展上述各种银晕结构与演化研究的观测基础。

得到这样的样本之后,我们将通过选择效应改正和模型拟合得到恒星晕的轮廓模型。由于LAMOST的数据样本纯度较高,很少有混入的盘族恒星,此外数据样本较以往大多数研究所用的都多,因此将用在40 kpc内检验断幂指数轮廓的真实性,并给出更加可靠的结构参数估计。

参考文献

- [1] Dalcanton J J, Spergel D N, Summers F J. *Astrophys. J.*, 1997, 482:659
- [2] Mo H J, Mao Shude, White Simon D M. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1999, 304:175
- [3] Bullock J S, Johnston K V. *Astrophys. J.*, 2005, 635:931
- [4] Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. *Astrophys. J.*, 1962, 136:748
- [5] Searle L, Zinn R. *Astrophys. J.*, 1978, 225:357
- [6] Jurić M, Ivezić Ž, Brooks A *et al.* *Astrophys. J.*, 2008, 673:864
- [7] de Jong J T A, Yanny B, Rix H W *et al.* *Astrophys. J.*, 2010, 714:663
- [8] Bell E F, Zucker D B, Belokurov V *et al.* *Astrophys. J.*, 2008, 680:295
- [9] Ivezić Ž, Lupton R, Schlegel D *et al.* *Astron. Soc. Pacific Conference*, 2004, 327:104
- [10] Watkins L L, Evans N W, Belokurov V *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2009, 398:1757
- [11] Deason A J, Belokurov V, Evans N W *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2011, 411:1480
- [12] Carollo D, Beers T C, Lee Y S *et al.* *Nature*, 2007, 450:1020
- [13] Xu Y, Deng L C, Hu J Y. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2006, 368:1811
- [14] Newberg H J, Yanny B, Rockosi C *et al.* *Astrophys. J.*, 2002, 569:245
- [15] Newberg H J, Yanny B, Cole N *et al.* *Astrophys. J.*, 2007, 668:221
- [16] McConnachie A W, Irwin M J, Ibata R A *et al.* *Nature*, 2009, 461:66
- [17] Martínez-Delgado D, Pohlen M, Gabany R J *et al.* *Astrophys. J.*, 2009, 692:955
- [18] Majewski S R, Skrutskie M F, Weinberg M D *et al.* *Astrophys. J.*, 2003, 599:1082
- [19] Belokurov V, Zucker D B, Evans N W *et al.* *Astrophys. J. Lett.*, 2006, 642:137
- [20] Yanny B, Newberg H J, Johnson J A *et al.* *Astrophys. J.*, 2009, 700:1282
- [21] Koposov S E, Belokurov V, Evans N W *et al.* *Astrophys. J.*, 2012, 750:80
- [22] Carlin J L, Majewski S R, Casetti-Dinascu D I *et al.* *Astrophys. J.*, 2012, 744:25
- [23] Belokurov V, Koposov S E, Evans N W *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2014, 437:116
- [24] Penarrubia J, Zucker D B, Irwin M J *et al.* *Astrophys. J.*, 2011, 727L:2
- [25] Helmi A, White S D M. *Nature*, 1999, 402:53
- [26] Klement R J. *Astron. Astrophys. Rev.*, 2010, 18:567
- [27] Tolstoy E, Hill V, Tosi M *et al.* *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*,

- 2009, 47: 371
- [28] Xue X X, Rix H W, Zhao G *et al.* *Astrophys. J.*, 2008, 684: 1143
- [29] Klypin A, Zhao H, Somerville R S. *Astrophys. J.*, 2002, 753: 597
- [30] Bovy J, Rix H W. *Astrophys. J.*, 2013, 779: 115
- [31] Kalberla P M W, Dedes L, Kerp J *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2007, 469: 511
- [32] Kuijken K, Gilmore G. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1989, 239: 571
- [33] Holmberg J, Flynn C. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2000, 313: 209
- [34] Holmberg J, Flynn C. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2004, 352: 440
- [35] Garbari S, Liu C, Read J I *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2012, 425: 1445
- [36] Bovy J, Tremaine S. *Astrophys. J.*, 2012, 756: 89
- [37] Zhang L, Rix H W, van de Ven *et al.* *Astrophys. J.*, 2013, 772: 108
- [38] Moni B C, Carraro G, Méndez R A. *Astrophys. J.*, 2012, 747: 101
- [39] Smith M C, Okamoto S, Yuan H B *et al.* *Research Astron. Astrophys.*, 2012, 12: 1021
- [40] Piffl T, Scannapieco C, Binney J *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2014, 562A: 91
- [41] Bienaymé O, Famaey B, Siebert A *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2014, 571: 92
- [42] Read J I. *Journal of Physics G*, 2014, 41: 3101
- [43] Xue X X, Rix H W, Yanny B *et al.* *Astrophys. J.*, 2011, 738: 79
- [44] Kafle P R, Sharma S, Lewis G F *et al.* *Astrophys. J.*, 2012, 761: 98
- [45] Deason A J, Van der Marel R P, Guhathakurta P *et al.* *Astrophys. J.*, 2013, 766: 24
- [46] Liu C, van de Ven G, Fang M *et al.* *IAUS*, 2014a, 298: 424
- [47] Hills J G. *Nature*, 1988, 331: 687
- [48] Yu Q, Tremaine S. *Astrophys. J.*, 2003, 599: 1129
- [49] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J *et al.* *Astrophys. J.*, 2005, 622: L33
- [50] Wang B, Liu D, Jia S *et al.* *Intern. Astron. Union Sympos.*, 2014, 298: 442
- [51] Zheng Z, Carlin J L, Beers T O *et al.* *Astrophys. J.*, 2014, 785: L23
- [52] Zhong J, Chen L, Liu C *et al.* *Astrophys. J.*, 2014, 789: L2
- [53] Liu C, Deng L, Carlin J L *et al.* *Astrophys. J.*, 2014b, 790: 110
- [54] Zhao J, Zhao G, Chen Y *et al.* *Astrophys. J.*, 2014, 787: 31
- [55] Xia Q, Liu C, Mao S *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2015, in press, arXiv1412.4770



www.ilope-expo.com

 垂询电话: 010-8460 0344

北京国际光电产业博览会 暨

第二届中国国际激光·光电子及光电显示产品展览会

北京·中国国际展览中心(三元桥) 2015年10月14日-16日

<p>主办单位</p> <p>中国国际展览中心集团公司 中国光学光电子行业协会</p> <p>承办单位</p> <p>中国光学光电子行业协会 中展集团北京华港展览有限公司</p>	<p>支持单位</p> <p>中国工业和信息化部 中国物理学会 北京光机产业基地 韩国光产业振兴会</p> <p>展品范围</p> <p>激光与红外产品及设备 光电材料与元件</p>	<p>中国科技部 中国兵器工业集团公司 中国图形图像学学会 财团法人光电科技工业协会</p> <p>光电显示及照明 光学元件与材料</p>
		<p>中国科学院 北京生产力促进中心 日本光产业技术振兴会 新加坡光学与光子学学会</p> <p>LED & OLED & FPD 光通讯设备</p>