

文章编号: 1000-8349(2012)01-064-76

# 星流的搜寻

田 浩, 姜碧汾

(北京师范大学 天文系, 北京 100875)

**摘要:** 在冷暗物质的宇宙学模型框架里, 银河系 (尤其是银晕) 至少部分起源于对周围卫星星系的吸积。随着新技术和新设备的不断应用, 大规模巡天项目的成功实施使天文学家获得了越来越多、越来越全面的关于银河系的数据。通过对这些数据进行分析, 天文学家发现了很多星流的候选体, 为银河系的等级并合理理论提供了观测上的证据。随着对星流研究的扩大和深入, 人们对银河系及其结构和起源的了解也越来越详细。介绍了搜寻星流的方法, 以及基于这些方法获得的星流研究结果。

**关 键 词:** 银河系; 星流; 银晕; 演化

**中图分类号:** P145.2      **文献标识码:** A

## 1 引 言

近些年对于星系形成的研究取得了很大的进步。WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 测量的密度涨落功率谱<sup>[1]</sup> 与  $\Lambda$  冷暗物质 ( $\Lambda$ CDM) 模型非常一致<sup>[2]</sup>, 这促使人们越来越接受结构形成的等级模型 (hierachical model), 即星系的形成遵循从小到大的顺序, 小的星系形成之后, 大的星系通过吸积或者并合小星系而形成<sup>[3, 4]</sup>。银河系作为一个我们身处其中的大星系理所当然地成为检验星系形成模型的最佳实验室, 天文学家普遍认为银晕至少部分是由吸积形成的。

星流 (stellar stream) 一词与银河系的形成历史密切相关, 最早可追溯到 19 世纪。1894 年 Holmes Edwin 发表了一篇题目为《Star Streams》的文章<sup>[5]</sup>, 对星流进行了初步的探讨。根据现代天文学家对银河系结构与形成的研究, 星流是指在银河系的形成过程中, 吸积的矮星系 (dwarf galaxy) 被银河系的潮汐力撕碎而留在银河系内的那些恒星集团<sup>[6]</sup>。随着进一步的研究可知, 星流也指球状星团受潮汐力影响而产生的结构。Helmi 等人通过解析分析和宇宙学数值模拟得到结论: 在太阳附近的银晕中应该存在数百个星流, 并且, 数以百计的星流只是起源于屈指可数的星系<sup>[7]</sup>; 而 Gould 利用邻近矮星的自行数据得到的是大约 400

收稿日期: 2011-01-25; 修回日期: 2012-01-11

资助项目: 国家自然科学基金 (10973004, 11173007)

个星流<sup>[8]</sup>; Bullock 和 Johnston 的计算则表明, 在过去的 10~12Ga 中, 银河系应该吸积了 100~200 个明亮的卫星星系 (satellite galaxy)<sup>[9]</sup>。关于星流研究的现状是: 一方面, 天文学家对在银河系中存在星流达成了共识; 另一方面, 对于吸积的星系以及残留的星流的数目还存在不同意见, 也是需要更多研究的课题, 所以, 天文学家希望通过搜寻银河系中的尽量多的星流来对这些模型和理论进行检验。

从操作上讲, 对于星流的证认需要小心谨慎。星流集团中的恒星在几何空间和速度空间 (合在一起称为相空间) 具有成团性, 从而产生相应空间中的子结构。但是, 反过来看, 相空间中的子结构的主要起源却并不是星流。首先, 恒星的形成就具有成团性, 对应地, 疏散星团和球状星团就会呈现子结构; 其次, 旋臂产生的扰动和共振也会把恒星在一段时间内限制在一定的相空间区域内<sup>[10]</sup>; 还有核球的棒状结构也会把恒星圈在一定的范围内, 产生类似武仙座 (Hercules) 星流的结构<sup>[11-13]</sup>。星流与这些银河系自身的恒星集团最本质的区别当然在起源上, 但是, 认定恒星的起源是一件非常困难的事情。比如, 武仙座星流中恒星的年龄和金属丰度的分布范围都比较宽, 而一个被吸积的星系如果本身比较大, 它也可能在年龄和金属丰度方面具有比较大的弥散<sup>[14]</sup>, 因此, 也有人认为武仙座星流是源于河外的<sup>[15]</sup>。可见, 认定一个起源于河外的星流不是简单的。尽管如此, 天文学家付出了很大的努力, 兼有近些年巡天观测的快速发展, 有一些星流得到了大家的公认。

比较早期的恒星成团被怀疑源于河外可以追溯到 1989 年 Doinidis 和 Beers 的工作, 他们发现 5 颗水平分支恒星具有与众不同的特征<sup>[16]</sup>; 1992 年 Arnold 和 Gilmore 则发现 5 颗蓝水平分支恒星具有异样的速度特征<sup>[17]</sup>。这样的例子由于样本太小还不适合称之为星流, 真正的突破是在 1994 年, Ibata 等人发现了正在被银河系撕碎的人马座矮星系 (Sagittarius dwarf galaxy), 有几百个 K 型和 M 型的巨星在视向速度空间呈现了成团性, 是规模巨大的星流<sup>[18]</sup>。至今为止, 除了人马座星流之外, 有名的星流还包括孤儿 (Orphan) 星流<sup>[19]</sup>、室女 (Virgo) 星流<sup>[20]</sup>、大犬星流<sup>[21]</sup> 等。此外, 一些其它子结构也相继被发现, 但起源还有争论。这些星流或者候选体的成员引起了天文学家的极大兴趣, 人们对其进行了大量的观测和理论模拟, 值得大家关注。但需要指出的是, 星流并非只存在于银河系, 河外星系中也发现了不少星流。PAndAS 的观测表明, M31 外围存在一个很明显的椭圆形带状结构<sup>[22]</sup>。

## 2 星流搜寻的方法

矮星系被银河系吸积之后, 矮星系自身会吸引银河系中的恒星, 在其后形成恒星的聚集, 反过来, 这些聚集的恒星对矮星系产生引力, 使矮星系减速, 此即动力学摩擦, 导致矮星系的轨道衰变, 直至最后旋入银河系的中心。在轨道衰变的过程中, 矮星系受到银河系的潮汐力作用, 其中的部分恒星就会被剥落, 汇入银河系中, 形成导尾 (leading tail) 和拖尾 (trailing tail), 类似球状星团 Pal 5 的星流<sup>[23]</sup>。所以, 银河系吸积矮星系会留下大量的残骸, 这些残骸正是星流的原材料, 寻找它们成为追寻银河系形成历史的最好途径。

从理论上讲, 子结构存在于几何空间和速度空间。当矮星系的吸积发生在不远的过去时,

即  $t \approx t_{\text{orb}}$  ( $t_{\text{orb}}$  指被吸积星系绕转银河系一周的时间), 星流在几何空间是连贯的, 或者说, 星流保持着在几何空间内的相关性, 因此, 揭示这些结构的简单方法就是对晕星进行位置成图来寻找恒星过密的区域<sup>[24]</sup>; 当吸积事件发生在遥远的过去时, 即  $t \gg t_{\text{orb}}$ , 星流在几何空间的结构与银河系的背景完全混合在一起了, 但是, 在相空间里, 星流中的恒星仍然具有相近的速度, 所以, 即使几十亿年之后, 星流的速度结构依然会保留<sup>[25]</sup>。

## 2.1 在几何空间搜索

一个小的星系被银河系吸积以后, 最先消失的特征就是空间聚集的特征, 而且, 银河系的背景恒星密度比较高, 因此, 单纯从过高的空间密度来搜索星流是很困难的。但是, 另一方面, 恒星密度的过高是相对容易观测的现象, 不需要速度的信息, 尤其是比较年轻的星流依然保持着有几何空间的结构, 它们带来的过高空间密度非常明显。即使一些年老的星流, 借助赫罗图、金属丰度等信息也可以找到空间密度的过剩。Ivezic 等人<sup>[26]</sup>、Yanny 等人<sup>[27]</sup> 就利用空间密度的信息发现了星流。

由于年轻的结构可以在空间分布上凸显出来, 主要的已知星流都有空间结构, 人马座矮星系是最好的例子, 因为它是一个与银河系正在发生作用的星流, 可以非常清楚地看到潮汐撕裂的痕迹<sup>[18, 28]</sup>。这个星流发现不久, Mateo 等人发现向南的延伸部分<sup>[29]</sup>, 随之, Majewski 等人在主体往南  $40^\circ$  的地方也发现了残骸<sup>[30]</sup>。空间密度的过剩还分别表现在天琴座 RR 型变星和蓝水平支 (Blue Horizontal Branch) 恒星<sup>[26, 27]</sup>、红巨星 (red giants)<sup>[31]</sup>、碳星<sup>[32]</sup> 这些类型的恒星上。这个星流最壮观的图像来自 2MASS 巡天, Majewski 等人以 M 型巨星为示踪天体, 显示了这个星流在整个  $360^\circ$  天区内的全景分布<sup>[33]</sup>。人马座星流的情况比较特别, 星流的母星系很容易被证认出来了, 而且, 星流的轨迹也非常清楚, 所以, 各种类型的天体表现出来的结构都变得显而易见了。但是, 像人马座星流这样的情况仅此一例, 其余的星流都要难找得多。

从几何空间的过剩特征还发现了麒麟环 (Monoceros ring) 结构<sup>[34, 35]</sup>, 这是一个低银纬星流, 在反银心方向, 覆盖的经度范围达到  $100^\circ$ , 不过, 由于纬度较低, 这个结构究竟归属于银晕还是薄盘或者厚盘暂无定论。另外, 这个星流的起源也有争论, 有人认为它是某个吸积星系的残骸<sup>[7, 36-38]</sup>, 也有人认为它是与银盘的翘曲相关联的密度过剩<sup>[39, 40]</sup>, 还有人认为它是源于 Norma-Cygnus 旋臂的投影效应<sup>[41]</sup>。不过, 基于 SDSS 的数据, Grillmair 获得了麒麟环的过剩结构, 发现它至少部分地由一系列极窄的低纬度子结构组成<sup>[42]</sup>, 与 Penarrubia 等人的星系吸积模型<sup>[37]</sup> 非常一致。

还有其他一些结构也呈现出密度过剩, 如室女过剩区 (Virgo overdensity)<sup>[43]</sup>, Triangulum-Andromeda 过剩区<sup>[44]</sup>, Hercules-Aquila 云<sup>[45]</sup>。由于这些过剩结构的范围很宽, 它们的起源都不太清楚, 只有借助细致的运动学、金属丰度信息以及更加广泛的覆盖范围, 才能判断其是否真的来自河外。有一个范围较窄的结构是孤儿星流<sup>[46, 47]</sup>, 这个星流跨越  $124^\circ < \alpha < 251^\circ$ ,  $-1^\circ < \delta < 65^\circ$  区域, 长达  $60^\circ$ , 从 UMa 一直延伸到 Sextans<sup>[48]</sup>, 起源很可能是几十亿年前银河系吸积的一个矮球状天体<sup>[49]</sup>。另外, Grillmair 和 Dionatos 用同样的方法先后发现了 3 条潮汐流, 其中一条是球状星团 Pal 5 的一条拖尾<sup>[50]</sup>, 另外两条都是和球状星团相关联的星流遗迹<sup>[51, 52]</sup>。2009 年 Grillmair 还发现了银晕中的 4 条星流, 通过对其轨道

和形状的分析, 其中 3 条可能来源于球状星团, 而第 4 条则来源于矮星系<sup>[53]</sup>。

## 2.2 在速度空间搜索

$N$  体数值模拟表明, 一个低质量的系统被一个大星系吸积时就会形成星流<sup>[54]</sup>。星流在较短的时间内会在几何空间变得难以辨认, 但是, 之后的很长时间内将仍然保持运动学结构<sup>[25, 55-57]</sup>。在银河系内, 移动的恒星集团可以通过有限的相空间信息进行证认, 因为星流成员在几个轨道周期之后仍将保持在一个平面内, 不过, 受到银盘引力势影响的卫星星系的角动量将不再守恒, 轨道平面将会产生进动<sup>[25]</sup>, 在速度空间进行搜寻对这样的星系就不合适。

与几何空间信息相比, 速度的获取要困难一些, 而且, 一般需要数千个恒星的精确速度才能可靠地证认一个星流, 因此, 在速度空间挖掘子结构的工作也就不够充分。视向速度的获取需要恒星的光谱, 目前比较大型的恒星光谱巡天项目主要有两个, 一个是 SEGUE<sup>[58]</sup> (The Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration), 一共观测了  $15 < V < 21$  mag 范围内的 240 000 颗恒星, 速度分辨率约  $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 另一个是 RAVE<sup>[59]</sup> (The Radial Velocity Experiment), 观测约百万颗恒星, 速度分辨率约  $1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外, 中国的郭守敬望远镜也计划拍摄几百万颗恒星的光谱, 速度分辨率达到几  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当然, GAIA 项目<sup>[60]</sup> 会带来最完备的信息, 将获得所有亮于 20 mag 恒星的距离和自行, 亮于 17 mag 的视向速度。需要指出的是, 这里的速度空间不仅指速度分量本身, 也指利用速度得到的角动量或者能量。

### 2.2.1 速度及其弥散度

首先, 星流在速度和速度弥散度上会呈现出独特的性质。一个卫星星系中的恒星是集中在一个小的相空间里面的, 例如处在一个矮星系中的恒星被吸积到银河系之后, 将在相空间里面扩散。不过, 因为银河系平均恒星密度很低, 基本上可以近似为无碰撞的系统, 这些恒星将一起经历运动学的增长, 使得任何一颗恒星附近的相空间密度保持常数。比如 Helmi 和 White 证明, 在一个星流上的恒星的速度弥散度会因为空间密度的加强而以  $t^{-1}$  减小<sup>[25]</sup>。这就意味着, 相空间中一个被吸积的卫星星系残骸中恒星的密度会随着时间的增长而变得越来越低, 速度弥散会越来越大, 直到其在这个相空间中再也不能分辨开来。而观测者只能测量有限相空间的平均密度, 因此对于内银晕的星流, 由于其绕银心运动的轨道周期非常短, 来自同一个母星系的多个星流会在观测到的相空间中相互重叠, 这种多个星流在相空间相互重叠的现象被称为“相混合”<sup>[61]</sup>。由于相混合, 初始的相空间中高密度区域会变得稀薄, 直到最后恒星在相空间的弥散达到一个平衡态<sup>[62]</sup>。Helmi 和 White 计算出, 对于速度  $V$  (银盘上的切向分量), 一个完全的相混合可导致观测得到的速度弥散达  $50 \sim 150 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[25]</sup>。也就是说, 此方法中, 虽然速度信息比空间信息消失的时间较晚, 但是星流成员星在相空间密度的分布会由于相混合导致的速度弥散等致使星流的搜寻比较困难。

### 2.2.2 经典运动积分量

在运动积分量的空间中, 星流的特征更容易辨认。首先, 运动积分量既是位置也是速度的函数; 其次, 沿着相空间的任何一个恒星轨迹都是常数; 最后, 它不随时间而变化。如果一个恒星的运动积分量不同于相空间中相邻的点, 那么这个积分量就叫做孤立积分量<sup>[63]</sup>, 孤立积分量取决于势场。经典的孤立运动积分量有: 在一个稳态势下的能量  $E$ , 在一个球对称势



下的总角动量的三个分量, 或者一个轴对称势下的角动量在对称轴方向的分量  $L_z$ 。

实际上, 经典运动积分量  $(E, |\mathbf{L}|, L_z)$  已经被成功地应用在星流的搜寻上。Lynden-Bell 和 Lynden-Bell 在研究银河系的卫星星系以及外银晕中的球状星团时, 基于运动积分量搜索了星流<sup>[64]</sup>。他们认为: (1) 引力势可以近似为球形的; (2) 矮星系进入银晕后银晕中的引力势变化缓慢时, 由于潮汐剥离出来的矮星系的球状星团应该处于与原母星系相同的轨道平面上, 同时具有非常相近的角动量和能量。基于这个原理, Gao 等人对银河系中的球状星团进行了分析, 发现有 21 个球状星团在角动量和能量空间具有成团性<sup>[65]</sup>。

不过, 有 3 点限制需要注意。第一, 总角动量  $|\mathbf{L}|$  只有在球对称势下才严格守恒, 而银河系的引力势在严格意义上并不是球对称的。但是, 这不算一个严重的问题, 因为即使对于轴对称的平坦的引力势 (是银河系引力势的极好近似),  $|\mathbf{L}|$  也是近似守恒的<sup>[66]</sup>; 而且, Chiba 和 Beers 证明, 在一个非球形的 Stäckel 型引力势下的孤立运动积分量空间的恒星分布可以影射到一个球形势下的运动积分量空间<sup>[67]</sup>。第二, 连续的吸积和并合事件会不断地改变引力势和卫星轨道的能量, 但是, 在局域运动积分量空间的成团性表明: 弛豫带来的影响没有想象的那么大, 而且只有两三个极早期的大并合事件对内银晕有贡献。卫星星系的动力学摩擦和引力势的影响都会带来不同阶段剥离的恒星在  $(E, L_z)$  空间上留下多个痕迹。第三, 为了计算能量, 不仅需要可以观测的 6 维的相空间信息, 而且还需要不能直接观测的引力势信息。为此, 人们提出了所谓的“有效”运动积分量——既可以表征恒星的轨道又可以通过观测简单表达的参量。Helmi 等人提出, 近心点 (Apocenter)、远心点 (Pericenter) 和角动量  $L_z$  组成的空间, 即 APL 空间, 在这个空间里, 星流围绕等偏心率的直线成团<sup>[68]</sup>。从数值模拟的结果来看, 吸积产生的星流具有比较大的轨道偏心率, 而太阳附近的恒星的轨道偏心率一般就在 0.2~0.3 左右<sup>[69]</sup>。然而, 偏心率的计算也需要对引力势进行猜测, 因此, 引力势是限制星流模型的一个重要参量。Arifyanto 和 Fuchs<sup>[70]</sup>, Dettbarn 等人<sup>[71]</sup>, Klement 等人<sup>[72, 73]</sup> 采取了类似的方法, 也试图发现轨道偏心率相同的恒星。

Helmi 等人成功地运用了运动积分量, 他们在速度空间里探测到了两个星流<sup>[74]</sup>, Képley 等人认为它们起源于同一个卫星星系<sup>[75]</sup>。这样的星流之所以能被探测到, 有 3 个原因。首先, 搜索是在运动积分量的空间 (即角动量的两个分量) 进行的, 在这个空间里具有共同起源的恒星成团性非常强; 其次, 星流中的恒星目前正好处在近心点 (即离银心最近的地点), 在轨道拐弯的地方, 星流的密度会增加; 第三个原因是, 被吸积恒星的运动积分量与太阳附近银晕的恒星有显著的差别。

### 2.2.3 作用量-角度

第三种在相空间搜索星流的方式, 就是在作用量-角度坐标系  $(J, \Theta)$  中的粒子的弥散<sup>[25, 62, 66]</sup>。在哈密顿力学中, 作用量和角度是一对特殊的正则变量, 角度的变化率是轨道频率, 而作用量是绝热不变量, 不随时间变化。所以, 如果忽略卫星星系的引力势对单个恒星的影响, 那么一个恒星的作用量  $J$  将保持常数, 而角度将随时间线性地增加。对于像银盘这样的平坦轴对称势形式来说, 作用量是三个孤立积分量  $E$ ,  $L_z$  和  $I_3$  (与总角动量和引力势有关的一个积分量) 的函数。这个坐标系的优点是, 即使引力势发生了缓慢的变化, 星流的恒星仍然会在这些积分量的空间里成团。

单纯从理论上, 应用角度信息的轨道频率空间是很有前途的<sup>[76]</sup>。这是因为, 在一个稳态势下, 曾经被剥离的恒星在轨道频率空间会呈现出独特的成团性, 星流和星流之间不仅可以区分开来, 而且相互之间的距离与星流产生的时间有关, 也就是说, 我们能够获得星流产生的时间信息, 甚至包括引力势的增长时标, 这一点是只能限制今天的引力势的经典积分量  $E$  和  $L_z$  无法比拟的<sup>[77]</sup>。Gómez 和 Helmi<sup>[78]</sup> 已经证明, 对于一个随时间演化的势, 甚至是一个卫星星系被吸积到盘上, 频率空间的成团性将依然保持。他们应用频率空间的成团性, 在包含 42 个瓦解的卫星星系的模拟 GAIA 星表中进行计算, 考虑了观测误差和银晕、核球、银盘随时间变化的势, 结果表明, 对于相对视差的误差小于 0.02 的观测, 在频率空间可以清楚地区分相邻的星流, 并且确定吸积发生的时间也是可能的<sup>[78]</sup>。

作用量  $|J|$  也可以用来认证星流, 只是在  $(J_r, J_\phi)$  空间里, 不如在  $(E, L_z)$  空间那么明显<sup>[78]</sup>, 也就是说, 从这一方面来看, 作用量这个空间没有优势。

到目前为止, 关于作用量-角度空间的研究主要是理论模型的, 真正直接使用作用量-角度变量来搜寻星流的工作还是零零星星的<sup>[67]</sup>, 原因可能在于作用量-角度变量的计算对于可积的、不依赖于时间的势是容易的, 而对于银河系未知的势, 首先要建立势函数, 其次, 这些变量的计算必须要使用数值计算方法<sup>[79, 80]</sup>。

### 3 结 果

20 世纪 70 年代以来, 很多星流被人发现, 正在并合或者已经并合的卫星星系被发现。在表 1 中, 我们列举了银河系中的星流及其发现者和发现时间。通过对星流的研究, 天文学家对银河系附近的卫星星系进行了细致的研究, 对银河系的周围环境、银河系自身的结构和演化有了进一步的认识和了解。下面详细介绍已经发现的一些星流和通过对一些星流的研究所得到的关于银河系结构的结果。

#### 3.1 发现的星流

基于 SDSS、2MASS 和 RAVE 等一些大型巡天项目的观测数据, Lynden-Bell、Helmi、Majewski 和 Grillmair 等人做了大量的工作, 发现或者证实了一些星流, 如武仙座星流、人马座星流等, 其中 Sagittarius 星流被看作星流存在的直接证据, 是星流中观测和研究得最多的。

#### 3.2 著名的星流

自从星流被发现以来, 众多的天文学家对星流的特性、动力学进行了深入细致的研究, 同时, 通过对星流的研究加深了对银河系的质量及其分布和银晕结构等的了解。下面我们介绍 4 个著名的并且得到了较多认可的星流。

##### 3.2.1 人马座星流 (Sagittarius Stream)

人马座星流是星流存在的最直接证据, 对其结构的研究也比较深入。人马座星流在空间中的结构非常明显, 就像一个巨大的恒星项链环绕着银河系, 其轨道几乎与银道面垂直, 见图 1。这个星流的母体是可以认证的, 即人马座矮椭圆星系。人马座星流的尺度非常大, 穿越

表 1 银河系内的星流

星流	发现者	发现时间
Groombrige1830 星流	Eggen 和 Sandage	1959 年 <sup>[109]</sup>
大角星流 (Arcturus)	Eggen	1971 年 <sup>[110]</sup>
麦哲伦星流 (Magellanic)	Mathewson 等人	1974 年 <sup>[85]</sup>
人马座星流 (Sagittarius)	Ibata 等人	1994 年 <sup>[18]</sup>
H99 星流	Helmi 等人	1999 年 <sup>[74]</sup>
$\omega$ Cen 星流	Dinescu	2002 年 <sup>[111]</sup>
麒麟环 (Monoceros)	Newberg 等人	2002 年 <sup>[21]</sup>
RHLS 星流	Re Fiorentin 等人	2005 年 <sup>[112]</sup>
室女座星流 (Virgo)	Duffau 等人	2006 年 <sup>[105]</sup>
孤儿星流 (Orphan)	Belokurov 等人	2006 年 <sup>[19]</sup>
GJ06 星流	Grillmair 和 Johnson	2006 年 <sup>[113]</sup>
GD1 星流	Grillmair 和 Dionatos	2006 年 <sup>[51]</sup>
AF06 星流	Arifyanto 和 Fuchs	2006 年 <sup>[70]</sup>
S1	Dettbarn 等人	2007 年 <sup>[71]</sup>
S2	Dettbarn 等人	2007 年 <sup>[71]</sup>
S3	Dettbarn 等人	2007 年 <sup>[71]</sup>
KFR08 星流	Klement 等人	2008 年 <sup>[72]</sup>
阿克伦星流 (Acheron)	Grillmair	2009 年 <sup>[53]</sup>
科库托斯星流 (Cocytos)	Grillmair	2009 年 <sup>[53]</sup>
勒忒星流 (Lethe)	Grillmair	2009 年 <sup>[53]</sup>
斯提克斯星流 (Styx)	Grillmair	2009 年 <sup>[53]</sup>
C1 星流	Klement 等人	2009 年 <sup>[73]</sup>
C2 星流	Klement 等人	2009 年 <sup>[73]</sup>
C3 星流	Klement 等人	2009 年 <sup>[73]</sup>
C4 星流	Klement 等人	2009 年 <sup>[73]</sup>
SKOa 星流	Smith 等人	2009 年 <sup>[114]</sup>

整个银河系,从太阳附近一直延伸到银心距 90 kpc 处,其成员星的速度弥散度为 8.3 km/s,主体成员恒星的金属丰度分布范围很宽,从核球的  $-0.4$  一直到引导臂的  $-1.1$ <sup>[81]</sup>,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  和  $[\alpha/\text{Fe}]$  都高于银晕的主体恒星。

1994 年, Ibata 等人在银心方向发现了一组共同运动的恒星,它们属于一个位于人马星座的矮星系,这个矮星系是离银河系最近的矮星系<sup>[18]</sup>。Ibata 等人通过观测得知,这个矮星系的性质与银河系周围的其他矮星系相似,尺度和光度类似其中最大的 Fornax 矮星系。最重要的是,人马座矮星系在银道面的方向上被拉长了,表明它正在经历由银河系的潮汐力带来的撕扯。这是银河系正在吸积矮星系的直接证据,也标志着人马座星流的发现,之后,研究人马座星流的工作大量涌现。

1999 年, Ibata 通过运动学和结构参数的限制进行了数值模拟,认为人马座矮星系拥有

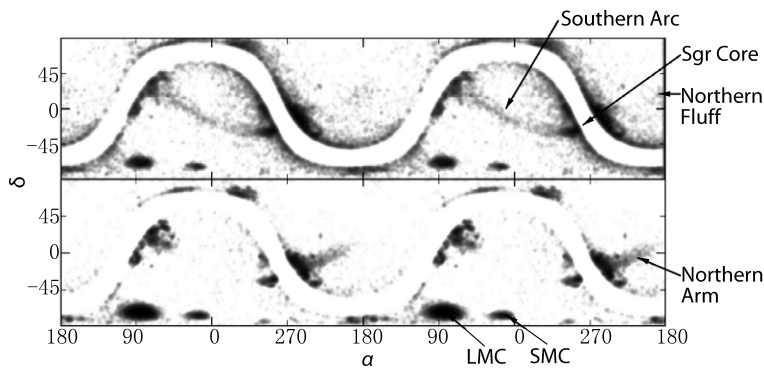


图 1 2MASS 数据揭示的人马座星流

图中显示的是点源的密度分布, 上图的点源为  $11 < K_s < 12 \text{ mag}$  且  $1.00 < J - K_s < 1.05 \text{ mag}$  的 M 型巨星, 下图的点源为  $12 < K_s < 13 \text{ mag}$  且  $1.05 < J - K_s < 1.15 \text{ mag}$  的 M 型巨星<sup>[33]</sup>。

一个巨大的暗物质晕, 而这个星系的最终命运是被银河系瓦解成星流, 星流中的成员仍然遵从矮星系自身在银晕中的轨道, 存活的时间可以长达几十亿年<sup>[82]</sup>。随后, 对高银纬的碳星进行了分析, 发现其中多于一半处在与人马座矮星系的中心相交的大圆上, 与他们的预言一致, 即人马座矮星系在银河系的强大潮汐作用下被撕碎, 形成一个与母体轨道相同的长星流<sup>[32]</sup>。同时, 根据人马座矮星系的位置和速度, 他们重建了它在标准银河系球形引力势下的轨道, 发现矮星系的轨道与星流的位置相交, 而且, 速度与碳星的运动速度吻合。星流的范围从银心距为 16 kpc 到 60 kpc 的范围。同时, 从这些恒星的大圆轨道可以推知, 银河系的引力势在星流的范围内是近球形的。

2003 年, Majewski 根据 2MASS 的近红外全天巡天数据中的 M 型红巨星对人马座星流进行了更大尺度的分析<sup>[33]</sup>。由于红巨星的高光度和近红外的低消光, 他们可以清楚地看到人马座矮星系的中心, 位于  $(\alpha, \delta) = (284^\circ, -30^\circ)$  (参见图 1)。以 King 模型近似密度分布, 得到主轴的半径达到  $30^\circ$ , 远超之前从碳星得到的尺度, 主体的亮度  $M_V = -13.27 \text{ mag}$ , 是银河系周围最亮的矮星系, 整体质光比为 25 (太阳单位)。他们还发现一条 trailing (拖曳) 潮汐流, 从人马座的中心以弧形延伸至银河系的南半球, 并且, 处在  $\alpha = 180^\circ \sim 200^\circ$  之间的部分仍在并合。

2009 年, Law 等人提出, 轴对称的引力势模型得出的结论是有问题的, 虽然人马座引导流的角度进动需要球形的或者轻度扁椭球形的晕, 其中恒星的径向速度却需要长椭圆的晕模型<sup>[83]</sup>。为此, 他们重新建立了银晕模型, 这是一个三轴的模型, 其中的  $c/a \approx 0.67$ ,  $b/a \approx 0.83$ , 短轴与太阳和银心之间的连线 (X 轴) 一致, 长轴也在银盘上, 与 Y 轴接近, 这个模型能够自洽地解释所有目前已经清楚了解的人马座星流的相空间信息。

### 3.2.2 麦哲伦星流 (Magellanic Stream)

大约 40 年前, 人们发现一条长约  $100^\circ$  的 HI 流从麦哲伦云中浮出, 围绕着银河系, 被命名为麦哲伦流<sup>[84, 85]</sup>, 与之相伴的引导臂被怀疑来自麦哲伦云, 但是, 直到 Putman 等人<sup>[86]</sup>和 Lu 等人<sup>[87]</sup>的研究才确定了它和麦哲伦云之间的关系。Wakker 首次清晰地展示了麦哲伦



流的双重纤维状结构和复杂性<sup>[88]</sup>，后来 HIPASS 的高分辨率数据<sup>[89]</sup>显示了更多的细节<sup>[90]</sup>。Braun 和 Thilker<sup>[91]</sup>在对 M31 进行深度大视场 HI 巡天时，偶然发现西部区域的低亮度低密度发射与麦哲伦流是一致的，提出麦哲伦流比之前预想的范围要更加广大。Nidever 等人基于 GBT(绿岸望远镜)的观测，确定了麦哲伦流的长度比以前观测到的规模要长 40°，这样，麦哲伦流和引导臂加起来的长度有大约 200°<sup>[92]</sup>。

对于麦哲伦流的起源，一直有两种说法，一是麦哲伦云运动时产生的冲压剥离<sup>[93, 94]</sup>，另一是由于银河系引力势的潮汐剥离<sup>[95, 96]</sup>。潮汐模型能够正确地解释星流的形状、长度和速度梯度，并有引导臂产生，但是沿着这条星流的柱密度分布与观测吻合得不好；而冲压模型同样正确地得到了星流的长度、形状和速度梯度，优于潮汐模型的是得到了正确的柱密度，不足的是没有产生引导臂。Besla 等人根据麦哲伦云的自行数据进行了数值模拟，指出麦哲伦云可能还是第一次经过围绕银河系的轨道，新的轨道预言表明它们生命中的绝大部分时间都是孤立于银河系之外的<sup>[97]</sup>，这个图像挑战了麦哲伦流的两种经典机制。为了有效地移除星流中的气体，两种机制都要求麦哲伦云与银河系比较接近的时间尽可能的长。如果 Besla 等的建议是正确的，那么，冲压或者潮汐力本身都不能独自创造麦哲伦流，而更长的星流只会使这个问题更加严重。不过，Nidever 等人添加了麦哲伦流形成的第三种机制：井喷(blowout)机制，即处在东南方向的致密 HI 区的超巨型壳层把大麦哲云的气体吹到一个与大麦哲云相距较远的地方，使得冲压或者潮汐力足以剥离它们从而形成麦哲伦流<sup>[98]</sup>。在这个假设中，由于引入了超巨型壳层，极大地降低了对于冲压或者潮汐力的要求，从而使井喷与二者之一结合的模式更加强大大。

### 3.2.3 麒麟环 (Monoceros Ring)

麒麟环，也叫“麒麟座星流”，还叫“银河系反银心恒星结构(GASS)”，顾名思义，这个结构在反银心方向，处于麒麟座区域。2002年，Newberg 等人通过 SDSS 的数据发现了过密的麒麟环，处在低银纬区域，星流中的恒星与太阳的平均距离为 11 kpc<sup>[21]</sup>。随后，人们对于这个弧状结构进行了研究，以 2MASS 星表中的 M 型巨星为探针<sup>[33]</sup>，发现这个低银纬环的结构至少延伸到了银河系的第二和第三象限，金属丰度的范围也很宽，从  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6$ <sup>[34]</sup>到  $-0.4$ <sup>[99]</sup>。

麒麟环结构的起源是有争议的，有两大类观点：一种观点认为麒麟环是较高银纬银盘结构的一部分，源于银盘的翘曲或者其他的动力学激发<sup>[35, 100]</sup>；另外一种观点认为，麒麟环是卫星星系被撕碎后的潮汐残骸<sup>[35, 101]</sup>，而且，Martin 等人声称发现了过密的 CMa 区域，它正是麒麟环的前身<sup>[36]</sup>，但是，这个过密区的存在本身就受到了挑战<sup>[102]</sup>。2010年，Chou 等人分析了麒麟环中的 21 颗 M 型巨星的  $\alpha$  元素、s 过程元素、Ti、Y 和 La 元素的丰度，发现它们低于银河系的恒星，而与人马座星流、矮椭圆星系以及麦哲伦云中的恒星类似<sup>[103]</sup>，这或许可以作为支持潮汐模型的证据，但是，也不能完全排除这个环起源于更早形成的较外层银盘的可能性。

### 3.2.4 室女座星流 (Virgo Stream)

在室女座的方向上，首先是从 QUEST 数据中发现 RR Lyrae 型变星的过密<sup>[20]</sup>，后来

又从 SDSS 的数据中发现 F 型的主序星过剩<sup>[21]</sup>, 这就是后来被称作室女座星流的结构。从 QUEST 得到的结构与太阳的距离大约为 19 kpc, 赤经扩展的范围在  $175^\circ$  到  $200^\circ$  之间, 赤纬的范围遍布整个 QUEST 巡天的范围 ( $-2.3^\circ \sim 0.0^\circ$ )。后来, Duffau 等人测量了其中一个密集的子样本的视向速度, 相对银河系静止坐标系的速度为  $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 速度弥散度为  $17 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[105]</sup>。同时, 根据 SDSS 的数据, 估算其结构覆盖的天区至少有 106 平方度。Juric 等人利用 SDSS 的测光视差把室女座星流证认为一个大面积 (约 1000 平方度)、弥漫的结构, 距离在 6~20 kpc 之间<sup>[43]</sup>。最近, Vivas 等人得到的距离应该小于 13 kpc<sup>[104]</sup>。有趣的是, Martinez-Delgado 等人从模型计算得出结论, 室女座星流与人马座星流是有联系的, 人马座星流的潮汐尾应该经过室女座星流的天区<sup>[106]</sup>。遗憾的是, 这个模型预言人马座星流在这个位置的速度应该是大负值的, 与观测得到的最大峰值在  $130 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[107]</sup> 背离; 而且, 模型预言的这个区域的密度较低也与观测矛盾。2009 年, Prior 等人使用测光和分光的方法对 11 颗 RR Lyr 型变星进行观测, 发现它们的速度分布有两个峰值: 一个在  $127 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 弥散度为  $27 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 另一个峰值在  $-175 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 与人马座星流的期望值一致。也就是说, 这个星流中可能包含两个不同的成分, 其中一个成分来自人马座星流, 另一个是独立的<sup>[108]</sup>。他们获得的结果是, 这个星流的中心在  $(\alpha, \delta) \approx (186^\circ, -4^\circ)$  处, 面积约 760 平方度, 投影长度达 15 kpc, 向南延伸至赤纬  $-15^\circ$  即银纬约  $45^\circ$  的地方。值得注意的是, 此处的室女座星流不同于室女座过密区 (Virgo Overdensity)。室女座过密区域包含两部分, 一个为室女座星流 (Virgo Stellar Stream, VSS), 另外一部分为室女座过密区 (Virgo Overdensity, VOD)<sup>[107]</sup>。

## 4 展 望

星流作为卫星星系被银河系撕碎的遗迹, 对研究银河系的结构和历史都有重要的意义。虽然从原理上讲, 在几何空间和速度空间都有发现这些星流的可能性, 认证一个具体的星流却是非常不容易的。天文学家努力在不同的巡天数据中搜寻星流的蛛丝马迹, 尤其近些年的光谱巡天, 如 SDSS 提供了非常重要的信息。为了了解星流的起源、前身星系和星流之间的关系, 我们需要高精度的 3 维速度和空间信息, 在这方面, GAIA 项目将会带来巨大的突破, 同时, 也期望我国的郭守敬望远镜能够带来更多的发现。

### 致谢

感谢审稿人提出的建设性建议。

### 参考文献:

- [1] Sperel D N, Lerde L, Peiris H V, et al. ApJS, 2003, 148: 175
- [2] Mo H J, Mao S D, White S D M. MNRAS, 1998, 295: 319
- [3] Benson A J, Bower R G, Frenk C S, et al. ApJ, 2003, 599: 38
- [4] Springel V, Hernquist L. ASUP, 2003, 208: 273
- [5] Holmes E. JBAA, 1894, 5: 26
- [6] Eggen O J. AJ, 1996, 112: 1595

- 
- [7] Helmi A, Navarro J F, Meza A, et al. *ApJ*, 2003, 592: L25
- [8] Gould A. *ApJ*, 2003, 592: L63
- [9] Bullock J S, Johnson K V. *ApJ*, 2005, 635: 931
- [10] de Simone R, Wu R A, Tremaine S. *MNRAS*, 2004, 350: 627
- [11] Dehnen W. *AJ*, 1998, 115: 2384
- [12] Dehnen W. *AJ*, 2000, 119: 800
- [13] Fux R. *A&A*, 2001, 373: 511
- [14] Navarro J F, Helmi A, Freeman K C. *ApJ*, 2004, 601: L43
- [15] Bensby T, Oey M S, Feltzing S, et al. *mru*, 2008, conf: 62
- [16] Doinidis S P, Beers T C. *ApJ*, 1989, 340: L57
- [17] Arnold R, Gilmore G. *MNRAS*, 1994, 257: 225
- [18] Ibata R A, Gilmore G, Irwin M J. *Nature*, 1994, 370: 194
- [19] Belokurov V, Evans N W, Irwin M J, et al. *ApJ*, 2006a, 637: L29
- [20] Vivas A K, Zinn R, Andrews P, et al. *ApJ*, 2001, 554: L33
- [21] Newberg H J, Yanny B, Rockosi C, et al. *ApJ*, 2002, 569: 245
- [22] McConnachie A W, Irwin M J, Ibata R A, et al. *Nature*, 2009, 461: 66
- [23] Odenkirchen M, Dehnen W, Newberg H J, et al. *ASPC*, 2003, 298: 4430
- [24] Johnston K V, Herquist L, Bolte M. *ApJ*, 1996, 465: 278
- [25] Helmi A, White S D M. *ASPC*, 1999, 165:89
- [26] Ivezić Z, Goldston J, Finlator K, et al. *AJ*, 2000, 120: 963
- [27] Yanny B, Newberg H J, Kent S, et al. *ApJ*, 2000, 540: 825
- [28] Gomez-Flechoso M A, Fux R, Martinet L. *A&A*, 1999, 347: 77
- [29] Mateo M, Olszewski E W, Morrison H L. *ApJ*, 1998, 508: L55
- [30] Majewski S R, Siegel M H, Kunkel W E, et al. *AJ*, 1999, 118: 1709
- [31] Dohm-Palmer R C, Helmi A, Morrison H L, et al. *ApJ*, 2001, 555: L37
- [32] Ibata R, Lewis G F, Irwin M, et al. *ApJ*, 2001, 551: 294
- [33] Majewski S R, Skrutskie M F, Weinberg M D, et al. *ApJ*, 2003, 599: 1082
- [34] Yanny B, Newberg H J, Grebel E K, et al. *ApJ*, 2003, 588: 824
- [35] Ibata R A, Irwin M J, Lewis G F, et al. *MNRAS*, 2003, 340: L21
- [36] Martin N F, Ibata R A, Conn B C, et al. *MNRAS*, 2004, 355: L33
- [37] Penarrubia J, Martinez-Delgado D, Rix H W, et al. *ApJ*, 2005, 626: 128
- [38] Martinez-Delgado D, Butler D J, Rix H W, et al. *ApJ*, 2005, 633: 205
- [39] Momany Y, Zaggia S R, Bonifacio P, et al. *A&A*, 2004, 421: L29
- [40] Momany Y, Zaggia S R, Gilmore G, et al. *A&A*, 2006, 451: 515
- [41] Moitinho A, Vazquez R A, Carraro G, et al. *MNRAS*, 2006, 368: L77
- [42] Grillmair C J. *ApJ*, 2006, 651: L29
- [43] Juric M, Ivezić Z, Brooks A, et al. *ApJ*, 2008, 673: 864
- [44] Rocha-Pinto H J, Majewski S R, Skrutskie M F, et al. *ApJ*, 2004, 615: 732
- [45] Belokurov V, Evans N W, Bell E F, et al. *ApJ*, 2007, 657: L89
- [46] Grillmair C J. *ApJ*, 2006, 645: L37
- [47] Belokurov V, Evans N W, Irwin M J, et al. *ApJ*, 2007, 658: 337
- [48] Grillmair C J. *ApJ*, 2006, 645: L37
- [49] Sales L V, Helmi A, Starkenburg E, et al. *MNRAS*, 2008, 389: 1391
- [50] Grillmair C J, Dionatos O. *ApJ*, 2006, 641: L37
- [51] Grillmair C J, Dionatos O. *ApJ*, 2006, 639: L17
- [52] Grillmair C J, Dionatos O. *AAS*, 2006, 208: 4803
- [53] Grillmair C J. *ApJ*, 2009, 693: 1118
- [54] Harding P, Morrison H L, Olszewski E W, et al. *AJ*, 2001, 122: 1397
- [55] Tremaine S. *AIPC*, 1993, 278: 599

- 
- [56] Johnston K V, Zhao H S, Spergel D N, et al. *AAS*, 1998, 193:8402
- [57] Ibata R A, Lewis G F. *ApJ*, 1998, 500: 575
- [58] Beers T C, Lee Y, Sivarani T, et al. *IAUJD*, 2006, 13: 26
- [59] Steinmetz M, Zwitter T, Siebert A, et al. *AJ*, 2006, 132: 1654
- [60] Perryman M A C, de Boer K S, Gilmore G, et al. *A&A*, 2001, 369: 339
- [61] Klement R. *AAreview*, 2010, 18: 567
- [62] Tremaine S. *MNRAS*, 1999, 307: 877
- [63] Ollongren A. *BAN*, 1962, 16: 2410
- [64] Lynden-Bell D, Lynden-Bell R M. *MNRAS*, 1995, 275: 492
- [65] Gao S, Jiang B W, Zhao Y H. *ChJAA*, 2007, 7:111
- [66] Binney J, Tremaine S. *Galactic Dynamics Princeton*: Princeton University Press, 2008, 143: 170
- [67] Chiba M, Beers T C. *AJ*, 2000, 119: 2843
- [68] Helmi A, Navarro J F, Nordstrom B, et al. *MNRAS*, 2006, 365: 1309
- [69] Sales L V, Helmi A, Abadi M G, et al. *MNRAS*, 2009, 400: 61
- [70] Arifyanto M I, Fuchs B. *A&A*, 2006, 449: 533
- [71] Dettbarn C, Fuchs B, Flynn C, et al. *A&A*, 2007, 474: 857
- [72] Klement R, Fuchs B, Rix H W. *ApJ*, 2008, 685: 261
- [73] Klement R, Rix H W, Flynn C, et al. *ApJ*, 2009, 137: 4149
- [74] Helmi A, White S D M, de Zeeuw P T, et al. *Nature*, 1999, 402: 53
- [75] Kempley A A, Morrison H L, Helmi A, et al. *AJ*, 2007, 134: 1579
- [76] McMillan P J, Binney J. *MNRAS*, 2008, 390: 429
- [77] Penarrubia J, Benson A J, Martinez-Delgado D, et al. *ApJ*, 2006, 645: 240
- [78] Gomez F A, Helmi A. *MNRAS*, 2010, 401: 2285
- [79] Binney J, Spergel D. *MNRAS*, 1984, 206: 159
- [80] McGill C, Binney J. *MNRAS*, 1990, 244: 634
- [81] Chou M Y, Majewski S R, Cunha K, et al. *ApJ*, 2007, 670: 346
- [82] Ibata R. *IAUS*, 1999, 186: 39
- [83] Law D R, Majewski S R, Johnston K V. *ApJ*, 2009, 703: 67
- [84] Wannier P, Wrixon G T. *ApJ*, 1972, 173: L119
- [85] Mathewson D S, Cleary M N, Murray J D. *ApJ*, 1974, 190: 291
- [86] Putman M E, Gibson B K, Staveley-Smith L, et al. *Nature*, 1998, 394: 752
- [87] Lu L, Wallace L W, Savage B D, et al. *AJ*, 1998, 115: 162
- [88] Wakker B P. *ApJS*, 2001, 136: 463
- [89] Barnes D G, Staveley-Smith L, de Blok W J G, et al. *MNRAS*, 2001, 322: 486
- [90] Putman M E, Bland-Hawthorn J, Veilleux S, et al. *ApJ*, 597: 948
- [91] Braun R, Thilker D. *ASPC*, 2004, 327: 139
- [92] Nidever D L, Majewski S R, Butler B W, et al. *ApJ*, 2010, 723: 1618
- [93] Meurer G R, Bicknell G V, Gingold R A. *PASAu*, 1985, 6:195
- [94] Mastropietro C, Moore B, Mayer L, et al. *MNRAS*, 2005, 336: 509
- [95] Murai T, Fujimoto M. *PASJ*, 1980, 32: 581
- [96] Connors T W, Kawata D, Gibson B K. *MNRAS*, 2006, 371: 108
- [97] Besla G, Kallivayalil N, Hernquist L, et al. *ApJ*, 2007, 668: 949
- [98] Nidever D L, Majewski S R, Burton W B. *ApJ*, 2008, 679: 432
- [99] Crane J D, Majewski S R, Rocha-Pinto H J, et al. *ApJ*. 2003, 594: 119
- [100] Younger J D, Besla G, Cox T J, et al. *ApJ*, 2008, 676: 21
- [101] Conn B C, Lane R R, Lewis G F, et al. *MNRAS*, 2007, 376: 939
- [102] Mateu C, Vivas A K, Zinn R, et al. *AJ*, 2009, 137: 4412
- [103] Chou M Y, Majewski S R, Cunha K, et al. *ApJ*, 2010, 720: L5
- [104] Vivas A K, Jaffe Y L, Zinn R, et al. *AJ*, 2008, 136: 1645



- [105] Duffau S, Zinn R, Vivas A K, et al. ApJ, 2006, 636: 97  
[106] Martinez-Delgado D, Penarrubia J, Juric M, et al. ApJ, 2007, 660: 1264  
[107] Newberg H J, Yanny B, Cole N, et al. ApJ, 2007, 668: 221  
[108] Prior S L, Da Costa G S, Keller S C, et al. ApJ, 2009, 691: 306  
[109] Eggen O J, Sandage A, MNRAS, 1959, 119: 255  
[110] Eggen O J, PASP, 1971,83: 271  
[111] Dinescu D I, ASPC, 2002, 265: 365  
[112] Re Fiorentin P, Helmi A, Lattanzi M G, et al. A&A, 2005, 439: 551  
[113] Grillmair C J, Johnson R, ApJ, 2006, 639: L17  
[114] Smith M C, Evans N W, Belokurov V, et al. MNRAS, 2009, 399: 1223

## Searching for the Stellar Streams

TIAN Hao, JIANG Bi-wei

*(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)*

**Abstract:** Within the  $\Lambda$ -CDM model, the structure is formed hierarchically. Considering our Galaxy within this model, it is formed at least partly by accreting the satellite galaxies. In the process of the accretion, the satellite galaxies are torn into stellar streams by the Galactic gravitational tidal force. The number, property and structure of the stellar streams help understanding the structure and the formation history of our Galaxy, and indirectly examine whether the model of hierarchical structure formation is true. This paper overviews the methods to search for stellar streams and the results of various searches. The methods are classified into two main types. One type of methods is based on over-density in the geometrical space caused by stellar streams which can exist for relatively short time, which is thus effective for finding young stellar streams. The other type of methods looks for the clustering structure in the phase space with the parameters being either velocity or integrals of motions, even in the action-angle space. Stellar streams can still be clustering in the phase space after the evidence in geometrical space disappears, which makes the phase space method better in searching for ghost stellar streams. In practice, both the geometrical and phase spaces are applied to search for and confirm the stellar streams. The Sagittarius stream presents itself with abundant evidences, including the overdensity of various types of objects such as M-type red giants. Moreover, the detailed study of the Sagittarius stream reveals the potential and structure of the Galactic halo. With the development of observational techniques and large-scale surveys, more and more stellar streams and candidates are found, e.g. the Magellanic stream, the Monoceros ring and the Virgo stream. Future projects such as GAIA and Guoshoujing telescope will help to discover more stellar streams in our Galaxy.

**Key words:** Galaxy; stellar streams; halo; structure