

银河

刘超

(中国科学院国家天文台 100101)

银河,它自古至今照耀在人类的夜空中亘古不变,常常成为文人骚客赞美自然之壮美和恢弘的载体。在人类文明史的绝大多数时间里,银河几乎就是我们所知道的全部宇宙!这一切的改变是从1920年那一场著名的大辩论开始的。4月26日,美国华盛顿的史密松自然历史博物馆,沙普利(Harlow Shapley)和柯蒂斯(Heber Curtis)展开了一场世纪大辩论。两位天文学家引经据典,沙普利试图证明银河系就是宇宙的全部,而柯蒂斯则阐述岛宇宙的观点认为银河系仅仅是宇宙中的一座孤岛。大辩论没有形成最后的结论,一锤定音则是在4年之后,哈勃(Edwin Hubble)用干净利落的观测事实证明了仙女座大星云的距离远远大于银河系的尺寸。从此,银河回归了其本来面目——茫茫宇宙中一块小小的星系。

一、恒星测距——丈量银河的尺子

银河系作为一个整体在之后很长一段时间里,并不是大多数天文学家关注的热门对象。在我看来最主要的问题在于测距的困境。满天繁星绝大多数都是银河系的一份子,尽管如此容易地被人观察到它们的光,却很难确定它们到我们的距离。由于不同类型的恒星内禀光度相差了10多个量级,我们无法直接从它们的视亮度判断它们的远近。

千年以来,天文学家一直试图解决这个技术困难。古希腊的依巴谷(Hipparchus)首次提出采用三角视差的方法测量恒星的距离(图1)。尽管因为仪器测量精度的问题直到1838年贝塞尔(Fredrich Bessel)才首次成功测量出恒星61 Cygni的三角视差,但是这至今仍然是最精确的恒星测距方法之

一,其原理仍为世界上最先进的天体测量卫星 Gaia 所采用。

在很长一段时间里,天文学家寻求其他方法测量恒星距离。20世纪以来,随着对恒星结构和演化的深入认识,采用测光和光谱方法测量的恒星距离越来越多。20世纪90年代获得成功的第一代天体测量卫星 Hipparcos 给出了距离太阳约100秒差距内11万颗恒星的三角视差距离。在此基础上,天文学家有效标定了其他距离测量方法的系统误差,获得了一大批恒星相对可靠的距离。

除了想方设法测定一般恒星的距离,天文学家也使用一些特殊恒星测量银河系的结构。这些特殊恒星包括造父变星、蓝水平分支星、天琴座RR变星、红团簇巨星等,它们通常认为是“标准烛光”,即

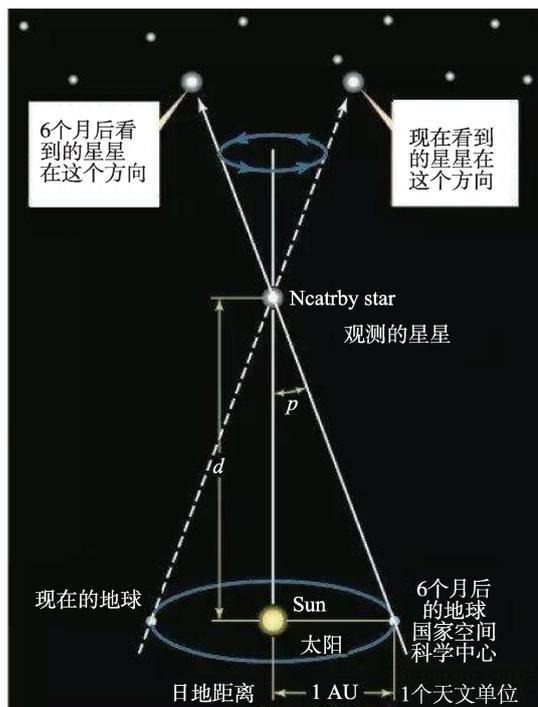


图1 三角视差的示意图

它们的内禀光度是基本确定的,因此根据它们的视亮度可以很容易获得距离。由于这些标准烛光星通常都比较亮,因此可以获得远超三角视差所能达到的遥远距离。

有了各种距离测量手段,天文学家得以深入理解银河系的结构。

二、银河中心区——复杂的动力学结构

多波段联合观测发现银河系中心存在一个超大质量黑洞,对它周围恒星的运动轨迹分析进一步测定了黑洞的质量为 4×10^6 倍太阳质量^①。相比很多遥远的活动星系核中正在吞噬大量物质而产生巨



图2 COBE卫星在红外波段观测到的银河系,中心呈现左厚右薄的盒型区域为核球区。(NASA, GSFC, COBE - Slide 10 of COBE slide set at NASA GSFC http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/more_images/cobeslide10.jpg)

三、银盘——特征显著但充满谜团

银盘一般特征

相比中心黑洞和棒状结构的发现与证实,银河系的盘结构研究就没有那么一帆风顺。银河系很早就被认为是一个盘星系,20世纪50年代在中性氢观测中发现了旋臂结构进一步证明银河系是一个盘星系。很多研究认为银盘的总质量大约为 5×10^{10} 倍太阳质量^①。但是要想弄清楚银盘具体形状并不是一件容易的事情。首先,一直到20世纪80年代,对银河系恒星的三维计数都仅仅限于少数很小的天区^③。一些天文学家选择某个特定视角对恒星进行计数,取得了管中窥豹的效果。Gilmore和Reid在1983年^④对南银极附近的恒星进行了统计,发现银盘不仅和河外星系一样在垂直方向上恒星数密度呈指数下降,还发现银盘的垂直数密度应该用两个指数形式,一个具有较小的标高,即它的厚度较

大辐射的黑洞,银河系中心的黑洞显得非常宁静。

20世纪80年代对核球区的中红外观测显示银河系具有一个盒型核球。图2中显示的左厚右薄的盒型核球区一直被怀疑实际上是一个棒结构的投影(称为“伪核球”)而非经典的椭球型核球。银河系中心区存在棒状结构在很多观测中得到越来越多的证实,而在2010年以沈俊太为首的团队开展的理论模拟研究中对这一假说给出了全面证实,一个在中心旋转的棒形结构不仅完美解释了不对称盒型核球的起源,还预测了核球区恒星的运动轨道特征并与其后澳大利亚团队的观测结果很好地吻合^②。银河系是一个存在棒状结构的棒旋星系终于成为了主流天文学界的共识^①。图3显示了银河系的想象图。

薄,另一个具有较大的标高,即厚度较厚。从此,人们认识到银盘分为薄盘和厚盘两个成分。

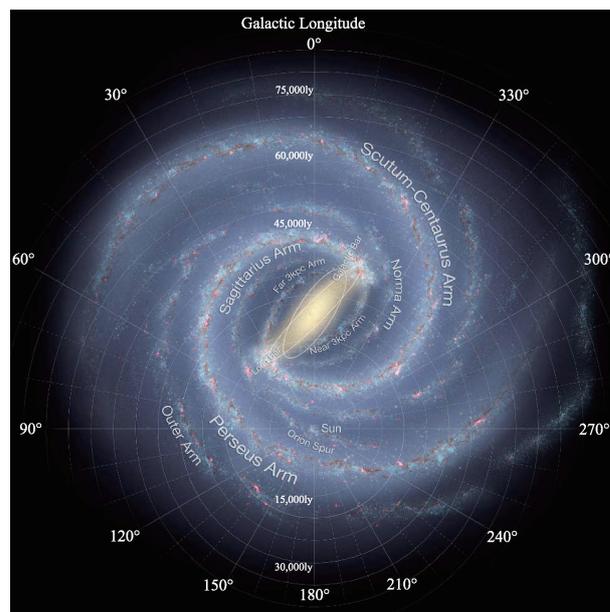


图3 中间带有棒状结构的银河系想象图(NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt - <http://www.eso.org/public/images/eso1339e/>)

此后30年大量的研究工作揭示了厚盘和薄盘具有不同的演化历史^⑤。现在的观测结果普遍证实薄盘是由高金属丰度、低 α 元素丰度的不同年龄恒星组成的,年龄最老的薄盘恒星也不过80亿年左右。而厚盘主要是由 α 元素丰度较高、金属丰度较低的年老星族组成的。从薄、厚盘恒星的运动来看,也证实厚盘星族具有不同于薄盘的运动学特征^⑥。

银盘(包括厚盘和薄盘)恒星的数目随着银河系中心的径向距离增加也大致呈指数下降^①。但这一特征在银河系的外围发生了改变。

银河系的外盘

通常的外盘是指到银心距离远于太阳位置的银盘部分。也许是由于这部分的恒星相对较少,在夜空中远没有银河系中心区域那么明亮,在相当长的时间里,天文学家对这部分的研究乏善可陈。那么银河系的外盘是否缺少研究价值呢?实际情况并不是这样的。首先,人们当然好奇银河系究竟有多大?代表银河系大小的一个典型尺寸就是银盘的半径。而这一数据在很长时间里都是一个粗糙的数值——15千秒差距。其次,银盘的大小直接关系到银河系的演化历史,河外星系的研究倾向于认为小质量的盘星系是从里到外差不多同步形成的而大质量的盘星系则是从里向外增长的。那么银河系属于哪一类呢?最后,近年来理论界认为银河系的外形受到了长期动力学演化的影响,这一影响倾向于将一个已经形成的银盘逐渐扩大开来。

由于与这些重要问题紧密关联,银河系外盘研究就变得举足轻重。比较早的突破是2002年Newberg等人^⑦使用SDSS巡天数据获得的。她们绘制了第一幅银河系外盘切片图,展示了至少两个恒星密度较高的区域,其中一个较远被称为“麒麟座星环”结构。这一工作着实令天文学家困惑了很多年:到底这个神秘的“麒麟座星环”是属于银盘的一个组成部分还是属于某个正在银河系周围处于瓦解状态的矮星系的残骸?

直到2015年,徐岩、Newberg等人^⑧发表了关于银河系外盘颇具颠覆性的一篇研究成果,她们发现

在银河系反银心方向(即从银心通过太阳指向外盘的方向)上外盘存在着恒星数密度的波浪形分布,整个外盘呈现出惊人的褶皱状形态(图4)。这项研究同时也指出银盘的半径至少有20千秒差距。

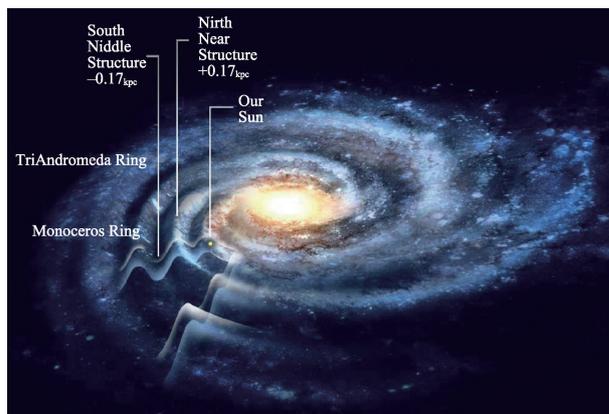


图4 银河系外围的褶皱结构的想象图

(<https://www.wallstreetotc.com/wp-content/uploads/2015/03/Corrugated-Milky-Way-Galaxy.jpg>)

许岩等人的这一项工作立即引起了对银河系外盘动力学不稳定性的广泛研究。很多理论工作认为银河系外盘出现这种褶皱形状应该是受到了某个从银河系旁边飞过的矮星系的动力学扰动而产生的。当然也有认为是受到旋臂的影响。

2018年欧洲空间局的Gaia天体测量卫星释放了第二批数据,包括了超过10多亿颗恒星的三角视差距离。这对银河系的研究具有划时代的意义。这使得人类首次准确地在三维空间中定位如此多的恒星,数据甫一发表立刻涌现出大量优秀的研究论文。其中以西班牙天文学家Antoja领导的一项工作最为受人瞩目^⑨。她们在太阳邻近数百万恒星的轨道相空间中发现了—个奇特的螺旋结构(图5)。这一结果清晰展示了银盘必定受到过一次矮星系的撞击,并且根据模型推断,这次撞击事件应该发生在3亿~9亿年之前。在宇宙尺度上看,这个时间是如此的近,在这个时间里地球上已经发生了寒武纪生命大爆发。随后,包括中国天文学家在内的不同团队分别确认了她们的分析结果^{⑩⑪⑫}。这是天文学将银河系作为一个整体开展系统研究以来的一个重大发现,揭示了银河系并没有看上去那么宁

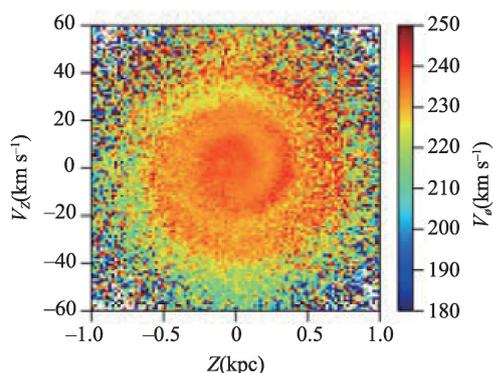


图5 太阳周围恒星在轨道相空间展示出螺旋结构。横坐标是恒星垂直于一盘的位置,纵坐标是恒星垂直方向运动速度,颜色代表恒星的平均周向运动速度(<https://www.nature.com/articles/s41586-018-0510-7/figures/1>)

静,而是不断受到或大或小的冲击,并在这些矮星系的影响下持续存在了一百多亿年。

关于银盘的大小,刘超等人使用我国大科学装置郭守敬望远镜开展的LAMOST光谱巡天数据再次确认了至少在20千秒差距以内,银盘的结构仍然清晰可见^{③④}。与许岩等人2015年的研究不同,这项研究没有使用局部天区观测结果,而是使用了覆盖了整个反银心天区的海量LAMOST恒星光谱数据,因此结论更加确凿。紧跟着西班牙的Lopez-Corredoira同中国天文学家合作,从LAMOST观测数据的外盘恒星金属丰度的分布出发识别更加遥远的银盘结构,发现直到大约25千秒差距银盘仍然可以分辨^⑤。时至今日,人们仍然没有探测到银盘的边界到底在哪里,但是如此之大的银盘已经超过了以往的认识,对银河系的演化理论提出了挑战。

更神奇的是,最近陈孝钿等人首次发现银河系的恒星盘是具有翘曲的,即一边向上翘,另一边则向下翘,像一个炸薯片的形状^⑥(图6)。这对银盘的动力学演化过程给出了很强的观测限制。

四、银晕——银河系早期形成的遗迹

银晕是指恒星在银河系外围构成的一个半径大于100千秒差距、近似于球形分布的结构。银晕内的恒星数目非常之少,只有大约十亿颗恒星^①。

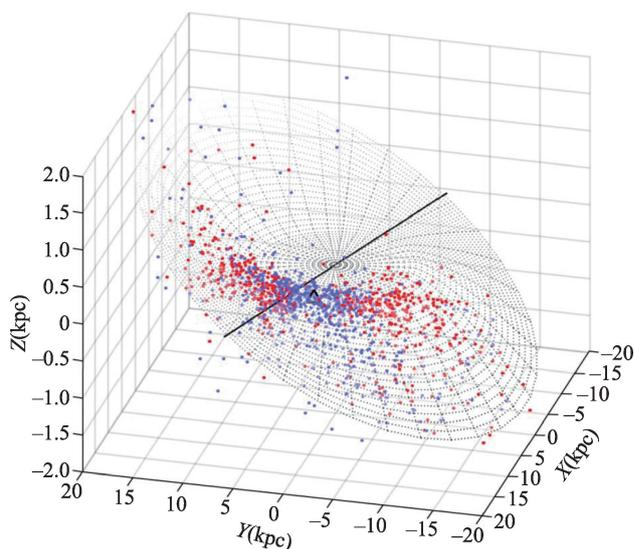


图6 恒星盘的翘曲结构

(<https://www.nature.com/articles/s41550-018-0686-7/figures/1>)

但是最近的研究发现,银晕中蕴含了大量的高温、稀薄气体,主要成分是氢,它们大多处于电离态,总质量约有 $2 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{10}$ 倍太阳质量^①。

虽然银晕中恒星很少,但是对于了解银河系的早期形成历史非常有意义。越来越多的研究发现绝大多数银晕恒星可能来源于矮星系或者球状星团的潮汐瓦解,而鲜有从银晕中的气体中直接形成的^{⑦⑧}。1994年发现人马座潮汐流以来,这一观点得到了越来越多的佐证。自1994年以来这25年,天文学家共发现了超过60条潮汐星流(图7)。它们是由正在瓦解的矮星系和球状星团贡献的,生动反映了银晕的形成过程。

Gaia提供的三角视差距离虽然在银晕的尺度上帮助不大,但是它提供的恒星切向速度在100千秒差距内大多是可靠的,这为确定潮汐流的三维速度提供了巨大帮助。最近李静等人^⑨使用LAMOST观测的M型巨星对最为显著的人马座星流做了细致的三维速度分析,得到了它在三维空间的运动特征,并且发现它最远的潮汐尾距银河系中心达到130千秒差距这一惊人的距离。此外,杨成群、薛香香等人也从LAMOST的红巨星中使用三维空间位置加上三维速度证认出大量的潮汐流,其中有些是

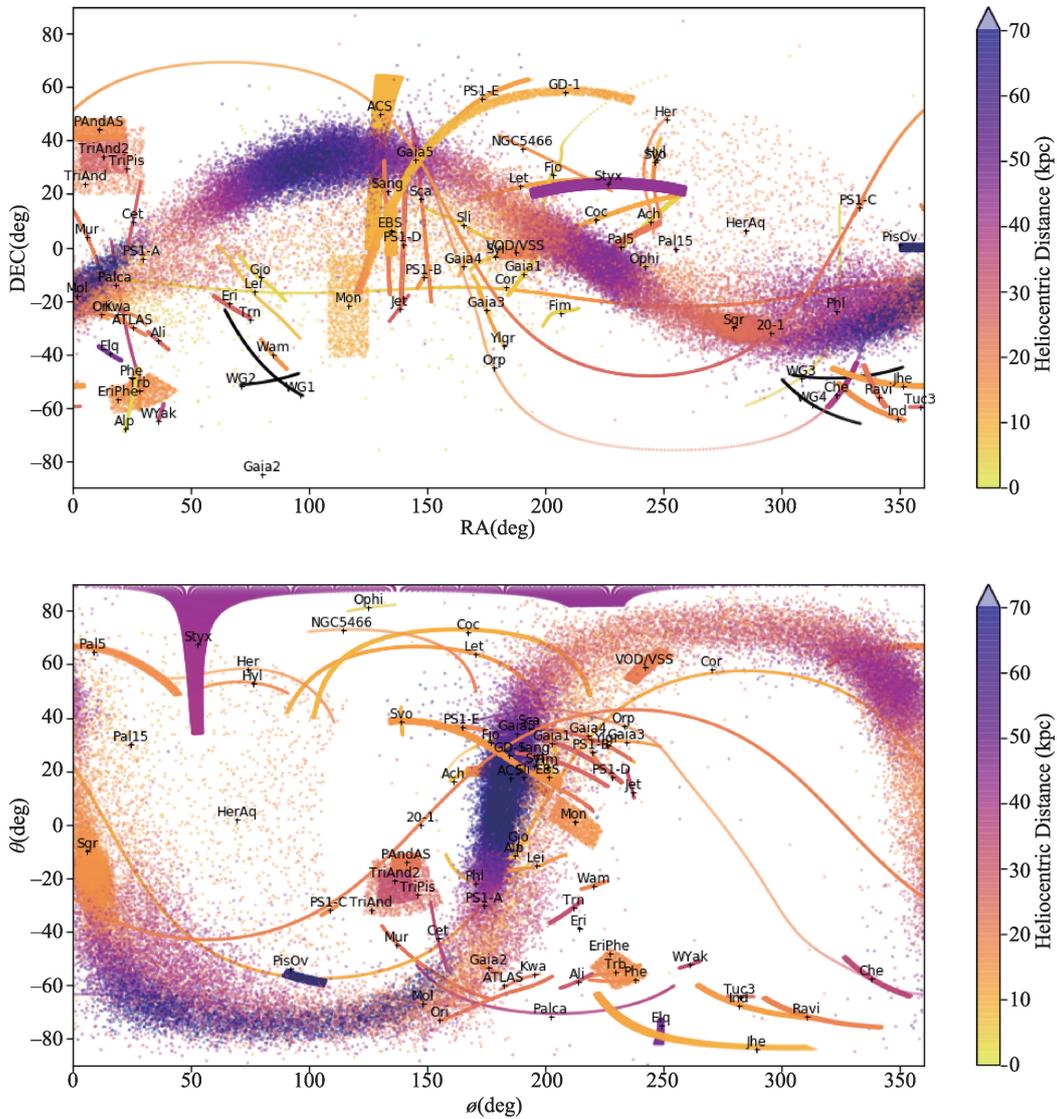


图7 部分已知的银河系潮汐星流的空间位置。(https://github.com/cmateur/galstreams)

新发现的^⑳。

随着越来越多更深的多色测光巡天的开展,发现更多更暗的潮汐星流尽管仍然很难,但已经不是极具挑战的工作了。天文学家把目光更多关注在分析潮汐星流的各种性质上。在已经发现的星流中,有一些呈现出奇怪的中断状结构。这引起了一些天文学家的关注。经过同数值模拟的结果比较,他们提出这些出现在潮汐星流上的中断很可能是潮汐星流靠近银河系晕中一些质量子结构而受到引力扰动所产生的^㉑。这些质量子结构可以是另外一些矮星系,也可能是看不见的暗物质子晕。

现在普遍认为银晕主要是靠矮星系和球状星团潮汐瓦解而形成,绝大多数潮汐瓦解发生在银河系形成的早期。因此那些差不多100亿年以前瓦解的潮汐星流经过漫长的时间已经彻底弛豫,即它们的运动轨道特征相比星流已经变得非常模糊,空间上也已经不再呈现出星流结构,而是同其他恒星充分混合在一起了。这样,它们看起来更像是一个平滑均匀的银晕。这个平滑银晕的恒星数密度一般认为是按幂律向外衰减的。很多天文学家一度基于数百到几千颗天琴RR变星或蓝水平支星的统计结果认定银晕的恒星数密度分布式呈双幂律衰减^㉒。

最近由许岩、刘超等人^⑤在使用将近 10000 颗 LAMOST 观测的红巨星数据重新对银晕结构进行的切片分析中首次直观地绘出了银晕的三维结构(图 8)。他们发现实际上银晕的内部呈现一个扁球形,越往外越趋近于球形。在考虑了银晕的扁率随银心距离平滑变化的情况下,恒星数密度可以很好的使用单幂律来描述。

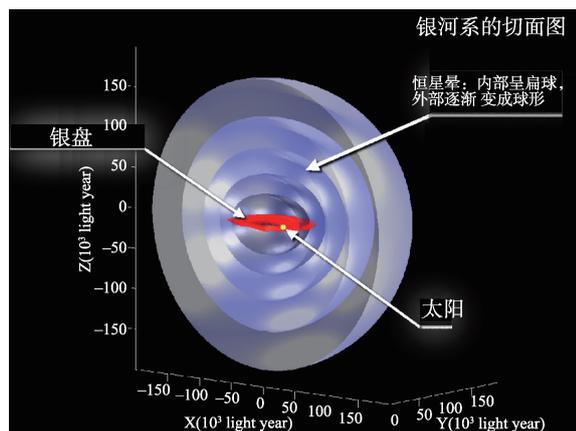


图8 银河系恒星晕在空间的分布内部呈现扁球结构,外部则逐渐演变成球形

五、暗物质晕——银河系和宇宙学的桥梁

按照标准宇宙模型,宇宙物质成分中绝大多数是暗物质,重子物质仅占 15% 多一点,剩下的都是由暗物质贡献的。在星系尺度上,暗物质的比例也是占绝对主导的。银河系暗物质占据总质量的 90% 左右,理论认为暗物质以晕的形式存在,包裹着银河系中绝大多数的重子物质。银河系暗物质质量的测量具有重要宇宙学意义,但是其测量值从 0.8 到 2.5×10^{12} 倍太阳质量差异很大。这些测量主要是通过测量银晕中恒星的运动并利用动力学模型估算得出。2017 年王文婷等人^⑥发表文章认为由于存在自由参数的简并性,一些动力学方法很难对银河系总质量做出精确估算。实测天文学家也在想尽各种办法,使用多种独立手段对银河系总质量进行更精确测定。

除了测量银河系总质量,荷兰天文学家 Oort 提

出了通过测量太阳附近恒星垂直方向的运动估计太阳附近总物质质量密度。扣除了重子物质密度,剩下的就是暗物质的局地密度。这一方法被沿用至今,随着观测数据的增加和动力学模型的不断改进,得到了很多结果^{⑦⑧}。同银河系总质量一样,这些结果从 0 到 0.022 倍太阳质量每立方秒差距不等,差异巨大。首先太阳附近的重子物质包括了恒星、行星、星际介质等多种形态的物质,其局地密度测定存在较大误差。其次,最近发现的银盘受到并合中矮星系影响而产生的动力学不稳定(密度和速度都呈现一定的波动),也会对太阳附近恒星运动产生影响。再次,采用不同的动力学模型会因为模型假设不同导致结果有所差异。这些问题汇集在一起,使得高精度测量局地暗物质质量密度极端困难。

银河系是星系天文学最早开展研究的对象,也是近年来的热点研究领域。银河系还有很多重要的问题没有解答:银盘的边界在哪里,旋臂是如何形成的,银河系和近邻的仙女座星系具有怎样的动力学联系等等。随着国内外多项巡天项目的开展,例如 LAMOST 光谱巡天,美国 SDSS-IV/V 光谱巡天,欧洲 Gaia 天体测量巡天等,天文学家已经汇聚了海量的恒星数据,包括 10 几亿恒星的天体测量参数、测光参数,上千万恒星的光学低分辨率光谱和数十万全天恒星的高分辨率近红外光谱数据。这些新数据将成为银河系研究取得新破的重要观测基础。

参考文献

- ① Bland-Hawthorn, J. & Gerhard, O., The Galaxy in context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 54, p. 529-596 (2016)
- ② Shen, J., Rich, R. Michael, Komendy, J. et al., Our Milky Way as a Pure-disk Galaxy—A Challenge for Galaxy Formation, The Astrophysical Journal Letters, vol. 720, p. L72-L76 (2010)
- ③ Bahcall, J. N. & Soneira, R. M., Star counts as an indicator of galactic structure and quasar evolution, Astrophysical Journal, vol. 238, p.17-20 (1980)
- ④ Gilmore, G., Reid, N., New light on faint stars - III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, vol. 202, p. 1025-1047

- (1983)
- ⑤ Rix, H-W. & Bovy, J., The Milky Way's stellar disk. Mapping and modeling the Galactic disk, *The Astronomy and Astrophysical Review*, vol. 21, id. 61 (2013)
 - ⑥ Yu, J. & Liu, C., The age-velocity dispersion relation of the Galactic discs from LAMOST-Gaia data, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 475, p. 1093-1103 (2018)
 - ⑦ Newberg, H. J., Yanny, B., Rockosi, C. et al., The Ghost of Sagittarius and Lumps in the Halo of the Milky Way, *The Astrophysical Journal*, vol. 569, p. 245-275 (2002)
 - ⑧ Xu, Y., Newberg, H. J., Carlin, J. L. et al., Rings and Radial Waves in the Disk of the Milky Way, *The Astrophysical Journal*, vol. 801, id. 105 (2015)
 - ⑨ Antoja, T., Helmi, A., Romero-Gomez, M. et al., A dynamically young and perturbed Milky Way disk, *Nature*, vol. 561, p. 360-362 (2018)
 - ⑩ Tian, H-J., Liu, C., Wu, Y., Xiang, M-S., Zhang, Y., Time Stamps of Vertical Phase Mixing in the Galactic Disk from LAMOST/Gaia Stars, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 865, id. L19 (2018)
 - ⑪ Binney, J. & Schoenrich, R., The origin of the Gaia phase-plane spiral, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 481, p. 1501-1506 (2018)
 - ⑫ Bland-Hawthorn, J., Sharma, Sanjib, Tepper-Garcia, T. et al., The GALAH survey and Gaia DR2: dissecting the stellar disc's phase space by age, action, chemistry, and location, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 486, p. 1167-1191 (2019)
 - ⑬ Liu, C., Xu, Y., Wan, J-C. et al., Mapping the Milky Way with LAMOST - I: method and overview, *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 17, id. 096 (2017)
 - ⑭ Wang, H-F., Liu, C., Xu, Y. et al., Mapping the Milky Way with LAMOST-III. Complicated spatial structure in the outer disc, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 478, p. 3367-3379 (2018)
 - ⑮ Lopez-Corredoira, M., Allende Prieto, C., Garzon, F. et al., Disk stars in the Milky Way detected beyond 25 kpc from its center, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 612, id. L8 (2018)
 - ⑯ Chen, X., Wang, S., Deng, L. et al., An intuitive 3D map of the Galactic warp's precession traced by classical Cepheids, *Nature Astronomy*, vol. 3, p. 320-325 (2019)
 - ⑰ Bell, E. F., Zucker, D. B., Belokurov, V. et al., The Accretion Origin of the Milky Way's Stellar Halo, *The Astrophysical Journal*, vol. 680, p. 295-311 (2008)
 - ⑱ Carlin, J. L., Liu, C., Newberg, H. J. et al., Characterizing the SHARDS of disrupted Milky Way Satellites with LAMOST, *The Astrophysical Journal*, vol. 822, id. 16 (2016)
 - ⑲ Li, J., Liu, C., Xue, X-X. et al., Detecting the Sagittarius Stream with LAMOST DR4 M Giants and Gaia DR2, *The Astrophysical Journal*, vol. 874, id. 138 (2019)
 - ⑳ Yang, C., Xue, X-X., Li, J. et al., Identifying Halo Substructure in 6D phase Space Using ~13000 LAMOST K Giants, *The Astrophysical Journal*, vol. 880, id. 65 (2019)
 - ㉑ Yang, C., Xue, X-X., Li, J. et al., Tracing Kinematic and Chemical Properties of Sagittarius Stream by K-Giants, M-Giants, and BHB stars, arXiv:1909.12558 (2019)
 - ㉒ Carlberg, R. G., Grillmair, C. J., Hetherington, N., The Pal 5 Star Stream Gaps, *The Astrophysical Journal*, vol. 760, id. 75 (2012)
 - ㉓ Xue, X-X., Rix, H-W., Ma, Z. et al., The Radial Profile and Flattening of the Milky Way's Stellar Halo to 80 kpc from the SEGUE K-giant Survey, *The Astrophysical Journal*, vol. 809, id. 144 (2016)
 - ㉔ Xu, Y., Liu, C., Xue, X-X. et al., Mapping the Milky Way with LAMOST - II. The stellar halo, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 473, p. 1244-1257 (2018)
 - ㉕ Wang, W., Han, J., Cole, S., Frenk, C., Sawala, T., What to expect from dynamical modelling of galactic haloes, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 470, p. 2351-2366 (2017)
 - ㉖ Read, J. I., The local dark matter density, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol. 41, id. 063101 (2014)
 - ㉗ Xia, Q., Liu, C., Mao, S. et al., Determining the local dark matter density with LAMOST data, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, vol. 458, p. 3839-3850 (2016)

