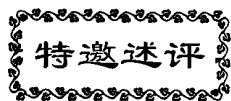


文章编号: 1000-8349(2011)02-123-09



银河系旋臂结构和运动学的 VLBI 高精度探测

徐 烨

(中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008)

摘要: 直接测量恒星形成区的距离, 从而确定银河系的旋臂结构以及银河系运动学的工作正在逐步展开。通过对恒星形成区脉泽的多历元 VLBI 观测, 利用类星体和脉泽相位参考技术, 精确地测定脉泽的位置、自行和视差。精确的距离能够确定旋臂的位置, 从而建立银河系旋臂结构的新模型; 运用绝对自行确定该处天体的三维运动, 由此精确测定银河系的旋转曲线, 导出银河系总质量和暗物质质量等基本物理参数。最近的初步结果表明银河系运动速度比以前认为的更快, 质量也更大。

关键词: 银河系结构; 三角视差; 天体脉泽

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

至今, 我们对银河系的结构、运动学以及质量等基本物理量仍然知之甚少。主要障碍是目前使用的银河系结构标准模型有很大的不确定性。通过观测河外旋涡星系, 人们发现大质量恒星形成区的 HII 区能够很好地示踪旋臂结构。然而, 因为我们处在银河系内部, 使得我们无法看到银河系的旋臂结构。早期, 人们通过 HI 辐射来研究银河系的结构^[1]。在银经-速度图上 HI 的辐射清楚地显示了一些连贯的大尺度结构, 这些结构可能是银河系中的旋臂。然而, 由于 HI 云的距离有很大的不确定性, 这使得将银经-速度转化为真正的银河系结构的工作变得很不确定^[2]。随后的毫米波分子观测, 如 CO, 同样也揭示了类似 HI 中的连贯的大尺度结构, 并且更明显^[3]。不过, 由于同样的问题, 分子云距离的不确定性再次使得精确描绘银河系旋臂结构成为梦想。1976 年 Georgelin 和 Georgelin (GG76)^[4] 结合年轻星的光学观测以

收稿日期: 2011-01-04; 修回日期: 2011-02-21

资助项目: 国家自然科学基金 (11073054, 10733030); 国家自然科学基金创新群体 (10621303); 973 计划 (2007CB815403)

及 HI 云和 HII 区辐射的射电数据, 描绘了一个比较完整的银河系结构平面图。但是这个模型主要基于运动学距离, 即由银河系旋转曲线结合视向速度获得。它存在的问题主要有: (1) 很难精确测定一条旋转曲线; (2) 在第一和第四象限存在运动学距离模糊, 即难以区分一个源是处在远运动学距离还是近运动学距离; (3) 天体的非圆运动。其中任何一点都将导致运动学距离出现大的误差。例如英仙臂 (Perseus), 即外太阳圈中离太阳最近的一条旋臂。Humphreys^[5] 根据银经 $132^{\circ}\sim 138^{\circ}$ 区域内的 Per OB1 和 Cas OB6 星协, 得到的光度距离大约为 2.2 kpc。然而, 由英仙臂中的分子云和 HII 区得到的运动学距离大约为 4.5 kpc。这个巨大的差异导致了长期激烈的争论, 即是否英仙臂的确存在运动学反常或者 O 型星的光度距离不准确。运动学距离极大的不确定性, 使得人们不可能依靠它建立起精确的银河系旋臂结构。尽管如此, GG76 模型仍然被作为银河系旋臂结构的标准模型沿用至今 (超过 30 a)。

2 利用三角视差获得距离

测量距离最基本和直接的方法是三角视差。传统的三角视差都是应用在光学波段, 其测量精度仅仅 1 mas 左右, 由此可得到精确的天体距离约为 100 pc, 显然这只能适用于精确测定太阳附近天体的距离。如果要在银河系范围内有效地获得三角视差, 精度必须提高 to 微角秒量级, 所以必须另辟途径。目前国际上分辨率最高的观测在射电波段。尽管甚长基线干涉 (very long baseline interferometry, 即 VLBI) 技术已经将测量精度提高到亚毫角秒量级, 但仍然远远不够。在射电波段影响观测精度的因素很多, 包括仪器误差、观测源的位置精度以及大气的影 响等。目前用于三角视差研究的观测设备主要包括美国的 VLBA (Very Long Baseline Array), 欧洲的 EVN (The European VLBI Network) 和日本的 VERA (VLBI for the Earth Rotation study and Astrometry)。这些设备为直接测量银河系中的天体, 建立银河系旋臂结构和三维运动奠定了基础。其中, 美国的 VLBA 经过 10 多年的运行, 其天线位置精度已经达到毫米量级, 具备极好的高精度测量条件。

VLBI 三角视差测量是通过测量银河系内天体由于地球的轨道运动而产生的相对于河外天体的正弦曲线运动从而拟合得到视差。因为 VLBI 只能测量极其致密并且辐射很强的源, 河外致密类星体是很好的观测源, 而在银河系内脉泽源也是 VLBI 的很好的研究对象。脉泽斑非常致密 (约 1 AU) 且亮 ($>10^8$ K), 因此成为 VLBI 观测的理想目标。恒星形成区主要有 22 GHz 水脉泽, 6.7 和 12.2 GHz 甲醇脉泽以及 1.6 GHz 羟基脉泽。羟基脉泽由于其频率低导致分辨率较低, 从而限制了 VLBI 的测量精度, 因此不适宜作为视差测量的目标源。水脉泽作为目标源能获得很高的分辨率, 但水脉泽寿命常常小于 1 a, 因此, 测量它的视差时, 每个历元的测量间隔一般应小于 3 个月, 这就需要更多的观测时间。甲醇脉泽的寿命很长, 最新结果表明 12 GHz 的甲醇脉泽的寿命超过 10 a^[6], 并且这种脉泽也能获得足够高的分辨率, 但它的数量很少 (<100), 只能作为一种补充。尽管 6.7 GHz 甲醇脉泽强而且数量多 (>1000), 但因为其频率低, 电离层的影响很大, 所以使用其作为目标源时, 如何消除电离层的影响是关键。

3 VLBI 高精度天体测量的基本要素

三角视差测量, 即测量银河系内天体相对于河外天体的运动, 必须使用 VLBI 相位参考技术。最常用的一种相位参考是通过在目标源和附近的校准源之间进行规则的摆动, 得到校准源的延迟、延迟率和相位变化, 然后将其应用到目标源的可见度数据中。相位参考能够增加图像的灵敏度和动态范围, 以及获得精确的较差天体测量。

3.1 相位参考的限制

VLBI 相位参考的精度受到众多因素限制。首先是目标源和背景源的角距离, 即摆动角 (switching angle)。对一阶效应来说, 相位参考的相位依赖于两个源之间的角距离。频率越高影响越大, 一般情况下, 对低频观测摆动角可以到几度, 对高频观测则应小于 1° ; 其次是摆动时间 (switching time), 即背景源和目标源之间交替的时间间隔, 同样, 频率越高时间必须越短, 低频观测可以几分钟, 而高频则应限制在 20 s 左右。影响相位参考的因素还有 VLBI 阵中天线的几何位置误差和仪器误差, 源的位置误差以及大气等, 其中几何和仪器误差对一个成熟的望远镜阵, 如 VLBA 已经不是主要问题。校准源位置的一阶误差将使目标源的位置漂移, 而二阶误差将会限制动态范围, 从而影响目标源的位置精度。地球大气的影响则是目前影响相位参考精度的主要瓶颈。所以, 对低俯仰的源进行相位参考观测时, 其摆动角和摆动时间都要相应减小。下一节将主要介绍大气对相位参考观测的影响。

3.1.1 大气

大气包括中性大气和电离层, 是每个天线主要的相位误差来源, 也是目前 VLBI 高精度测量的主要障碍。地面以上 60 km 的大气中, 分子和原子都处在中性状态, 为中性大气, 也称对流层。因为水蒸气和空气的折射率不等于 1, 导致了沿着源的视线有效距离的增加, 产生相位延迟。而在对流层之上, 由于太阳辐射, 大气被电离形成大量的正离子和电子, 构成电离层。射电波通过电离层时将产生折射, 从而引起了附加的相位延迟, 这种延迟与观测频率成平方反比关系。

对静态对流层的延迟, 目前的 VLBA 相关器预先建立了模型。它由两部分组成: 一是流体静力学部分, 它取决于天线的天顶角以及大地水平面上的高度, 也与季节相关; 在这之上叠加了一个随机变化量 (主要由水蒸气密度的变化引起), 导致天线的折射率快速变化, 这个部分被称之为动态部分, 它取决于天线的天顶角。在天顶方向, 干的对流层会导致大约 2 m 的延迟。尽管湿的贡献只有 0.3 m, 然而, 由于水蒸气的快速变化, 通过湿的对流层的传播延迟是高度动态性的。动态部分能够在每个天线上引起快速变化的随机相位误差。值得注意的是相关器没有对流层的动态延迟模型。

电离层效应也可分为平稳变化的静态部分, 以及叠加在此之上随机的动态部分。电子沿天顶的柱密度能够随着不同的天气、季节和太阳活动周有很大的变化。在太阳处在天顶极大方向时, 沿着源方向的总电子含量 (TEC) 的变化范围从 $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ (白天) 减小到 $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ (夜间)。在 1.6 GHz, 沿天顶方向的距离增量能够从 8 m (白天) 变化到 1.6 m (夜间)。对 VLBI 观测来说, 本地时间和每个天线的俯仰很不相同, 因此, 静态电离层误差是一个非常重要的相位误差来源。

动态电离层效应主要是声波通过上层大气导致 TEC 产生相当大的变化引起。对射电观测来说,最重要的是中等规模电离层湍流 (MSTIDs), 它的水平速度为 $100\sim 300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 周期 $10\sim 60\text{ min}$, 波长约为几百 km。典型的振幅 ΔTEC 大约为 10^{15} m^{-2} (白天 TEC 的 1%)。对 VLBI 观测而言, MSTIDs 会导致很大的相位误差。现在, 相关器模型还没有给出静态或动态电离层的传播延迟。

表 1 给出 VLBA 相关器未补偿的大气产生的沿天顶方向延迟。由表中可看出在低频处 (1.6 GHz 和 6.7 GHz 脉泽) 电离层效应的影响非常大。但是如果源足够强, 通过在分得足够开的频率上测量群延迟来估算电离层的 TEC (即, S/X 方法), 也能减小电离层效应。例如, 在频率 1.4~1.7 GHz 内使用摆动方式同时观测强源能够消除电离层效应。另外, 一些特殊天线允许同时观测 2.3 GHz 和 8.4 GHz。在对强源的测地和天体测量观测时, 通常使用双频观测来消除电离层效应。

表 1 VLBA 相关器未补偿的大气产生的天顶距延迟

序号	频率 (脉泽)	中性大气 /cm	电离层 /cm
1	43.1 GHz (氧化硅)	3	0.5
2	22.2 GHz (水)	3	2
3	12.2 GHz (甲醇)	3	6
4	6.7 GHz (甲醇)	3	20
5	1.6 GHz (羟基)	3	300

3.1.2 摆动角和摆动时间

摆动式相位参考中两个最关键的参数就是摆动角和摆动时间。原则上, 越小的摆动角和越短的摆动时间能够获得越精确的测量结果。但是要在目标源的附近找到一个强而致密的校准源并不是一件容易的事, 尤其在高频波段。因为校准源和背景源是在不同的天顶角观测, 因此, 在相关器模型中的误差是由在校准源和背景源之间不同的天顶角产生。在高天顶角方向, 即使小的摆动角, 这些误差仍然很大。为了解决这个问题, 必须使摆动角尽可能小并且避免高的天顶角。

摆动时间要求在摆动期间大气相位的任何变化必须小于半个周期, 即在摆动期间这个路径增量必须小于 $\lambda/2$ (半个波长)。如果这个条件不满足, 那么在连接两个校准源观测之间的相位是不确定的, 换句话说, 相位连接有问题。没有可靠的相位连接则不可能生成有用的目标源的图像。摆动时间在频率大于 5 GHz 时, 主要由对流层决定; 而小于 5 GHz 时, 则主要由电离层决定。

在任何波段上相位参考的成功部分依赖于天气条件, 它限制了摆动时间和摆动角。为了在全天空有效地使用相位参考, 必须在最大的摆动角之内找到合适的校准源。这样的校准源应当有致密的或者简单的结构, 并且能够在大多数基线上得到高的信噪比 (理想情况下, 在小于一半摆动时间间隔内应远大于 10)。为了获得高的动态范围, 校准源的位置误差应当限制在几个波束之内。

通常的相位参考技术能够得到相对位置的精度好于 1 mas。要得到更高的精度必须使

用特殊的观测技术, 如通过测地方法以及全天空致密源的监测来完善大气模型等。

4 精确测定英仙臂距离

在解决了一系列影响测量误差的挑战性难题以后, 2006 年 Xu 等人^[7] 获得了重大突破。他们使用美国的 VLBA 精确测定了英仙臂中大质量恒星形成区 W3OH 的距离, 精度达到 2%。

影响精度的最主要因素是大气, 其次是观测源的位置精度以及目标源与校准源的角距离。在高精度测量中, 最大的困难在于难以精确测定各个台站的垂直大气延迟。在 12 GHz, VLBA 相关器的模型对这种延迟的误差一般达到 10 cm。如此大的误差极大地限制了测量精度。为了解决这个问题, 他们观测了分布于全天不同方向的, 绝对位置精度很高 (好于 1 mas) 的几十个致密河外射电源, 通过测量它们的宽带延迟来求解每个台站的垂直大气延迟, 使得延迟误差减小到 0.2 cm。为了找到 W3OH 区域附近的河外射电源, 他们首先从 VLBA 校准源巡天资料里找到两个河外致密射电源, 它们离 W3OH 的角距离约 1° 。尽管这对 VLBA 相位参考观测已经足够, 但是由于系统误差通常能够限制相位参考的位置精度, 而系统误差与目标源和校准源的角距离紧密相关。因此他们使用美国的 VLA (Very Large array), 搜寻离 W3OH 更近的校准源, 成功地找到了一个与 W3OH 距离只有 0.5° 左右的致密河外射电源^[8], 并获得这个源的精确位置 (精度好于 50 mas)。这些措施极大地改善了 VLBA 的观测精度。从 2003 年 8 月至 2004 年 8 月, 共对 W3OH 中的 12.2 GHz 甲醇脉泽进行了 5 次观测, 获得了它的三角视差为 (0.512 ± 0.010) mas, 即 (1.95 ± 0.04) kpc (如图 1 所示), 彻底解决了英仙臂的距离争论。这个精度将以前天体测量的精度提高了 100 倍, 被誉为“开创了天文学中三角视差测量天体距离的新纪元”^[9]。它的意义在于, 从此人类能够直接测量整个银河系。

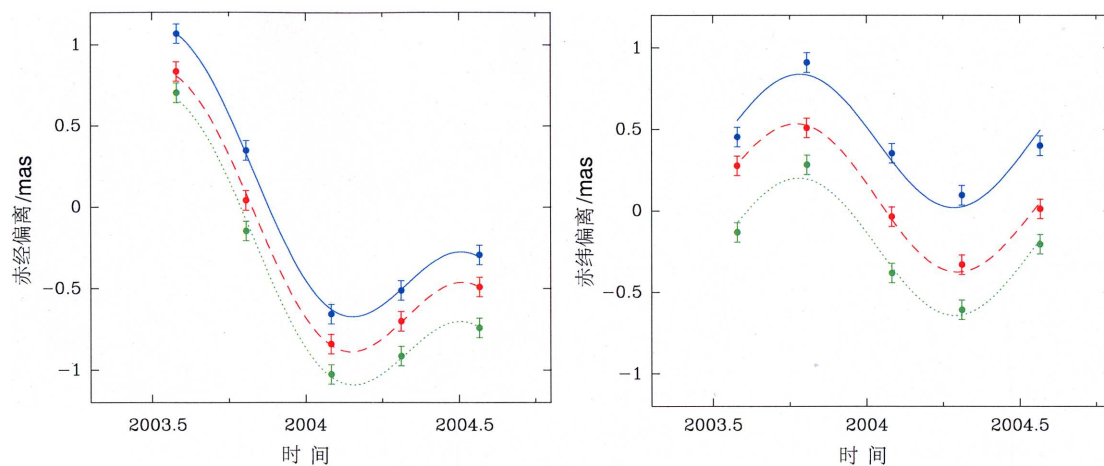


图 1 一个脉泽斑相对于三个背景源的位置随时间的变化

W3OH 和每个背景源之间大的位置差异已经消除。在每个图中, 上中下三类数据分别表示相对于背景源 J0230+621, J0231+628 和 J0235+622。曲线是使用 5 个参数的拟合: 一个是视差, 以及每个坐标的两个自行分量。

利用三角视差观测除了能得到源的精准距离, 同样能够给出非常好的长期自行, 精度可达到约 $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合自行 (以及距离) 和视向速度能够产生相对于太阳运动的三维速度。因为在银河系中太阳运动的精度达到 $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 观测区域真实的空间速度矢量将被精确地测定, 由此确定银河系各个部分的运动学, 精确地测定银河系的旋转曲线; 其次是以银心半径为函数的质量分布, 估算暗物质; 最后, 通过旋臂中物质实际的运动情况, 检验密度波理论是否适合银河系。Xu 等人的结果基本符合密度波理论^[9], 当然, 这还需要大量的观测来证实。

5 BeSSel 计划

2009 年美国的《The Astrophysical Journal》在同一期发表了 5 篇系列文章^[10-14], 全面展示了近期由 VLBA 观测获得的 10 个大质量恒星形成区的由三角视差确定的距离以及它们的三维运动。这些源的距离为 $0.7 \sim 5.9 \text{ kpc}$, 最高测量精度达到 0.006 mas 。随后 Reid 等人^[15]根据当时已经得到的 18 个由视差确定的距离推出新的银河系运动学参数。他们发现大部分源的视差距离比它们的运动学距离小。尤其重要的是, 他们发现了所有源有一个系统运动, 这些源的轨道运动速度比预计的小 $15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。因为这是人类历史上首次精确测定一批大质量恒星形成区的三维运动, 因此, 通过分析这种特殊运动, 他们勾画出新的银河系运动图景: 银河系的旋转速度比预计的 $220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 更快, 约 $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 由此导出银河系的质量更大, 大约是现在公认的 1.5 倍。这个结果毫无疑问是银河系结构和运动学的一个重大突破并且导致人们重新审查银河系的运动学参数。大质量恒星形成区运动速度比从依巴谷卫星资料导出的运动慢 $15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 这意味着大质量恒星形成区可能有自身的运动规律或者从依巴谷导出的运动学参数有问题。为此, Schönrich 等人^[16]重新分析了依巴谷资料, 他们发现以前给出的, 已经被广泛认同的太阳运动参数有很大的误差, 为此他们给出了新的参数。从新的参数看, 大质量恒星形成区的 $15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的异常已经大大缩小, 只有几 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 了。有待更多的视差结果来进一步检验大质量恒星形成区是否存在与银河系其他地方不同的运动。

值得注意的是, 一些大质量恒星形成区存在大的特殊运动, 如 Sanna 等人^[17]发现了一个 $60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 远离银心的运动, 而 Xu 等人^[18]也发现了一个远离银心的高速运动; 另一方面, 因为运动学距离基本上都比视差距离大, 在某些区域差距甚至达到 2 倍, 这说明银河系的结构和运动比一般的规则旋涡星系更复杂。

由于成功地解决了电离层的影响, Rygl 等人使用 EVN 观测 6.7 GHz 甲醇脉泽并成功地获得了一些大质量恒星形成区的三角视差^[19], 数量庞大的这类脉泽 (>1000) 为整个银道面进行三角视差测量提供了足够的目标源。

现在, 由 Reid 领导的团队已经获得了 VLBA “巨科学目标”的支持。这个项目的正式名称为 BeSSel Survey (Bar and Spiral Structure Legacy Survey, 即“贝塞尔”计划), 已经获得超过 5000 h 的 VLBA 观测时间。在最近 5~6 年内, 将每年获得超过 20% 的 VLBA 观测时间用来观测超过 500 个水脉泽和甲醇脉泽源。同时, 作为辅助观测, 他们也获得了

VLA, Green Bank Telescope 和 Effelsberg 100 m 等望远镜超过 300 h 的观测时间, 如此大规模的计划在射电天文史上是首次。伴随着这些工作的展开和完成, 银河系的尺度、质量以及三维运动将被很好地确定, 由此导出在所有尺度上暗物质的分布, 这对于定量研究暗物质在星系形成和演化中的作用是至关重要的。

6 其他银河系结构探索计划

6.1 VERA

VERA 是日本建造的专门用于测量银河系结构和它的三维运动的一个干涉阵。由于大气严重地限制了相位参考的精度, VERA 设计了能够同时测量目标源和背景源的干涉阵, 它能有效地消除大气相位涨落。VERA 由分布在日本诸岛的 4 个 VLBI 台站组成, 最长基线 2 300 km。通过比较两个源之间的相位, 可在同一时刻实现相位参考。VERA 的 4 个台站于 2002 年 3 月建成, 2002 年 11 月开始试观测。到目前为止, 已经得到了十几个天体的视差。预计不久更多源的视差结果将会被公布。VERA 与银河系结构相关的科学目标有:

- (1) 测量银河系内 500 个水脉泽和氧化硅脉泽的三角视差, 绘制银河系的三维图像;
- (2) 测量这些脉泽的自行, 直接揭示银河系内天体的三维速度场;
- (3) 测量 Mira 变星的距离, 建立其周光关系。

VERA 最近一个比较重要的工作是利用水脉泽获得了恒星形成区 S269 (Sharpless 269) 的视差距离, 由此判断在 S269 半径内的质量至少 30% 为暗物质^[15]。VERA 和 VLBA 形成了既相互竞争又相互补充的一个局面。一方面, 因为它们的观测结果相互独立, 因此可以相互比较、估值; 另一方面, 因为双方的科学目标大部分重叠, 又形成了竞争关系。下面是 VLBA 与 VERA 仪器参数比较:

- (1) 天线数量 (10 : 4);
- (2) 天线直径 (25 : 20 m);
- (3) 最长基线 (8 600 : 2 300 km);
- (4) 场地海拔 (0~4 000 : 0 m);
- (5) 观测时间 (有限 : 无限);
- (6) VERA 可以同时观测两个相近的源, VLBA 则不行。

总的来说, 对天体测量而言 VLBA 远胜于 VERA, 并且 VLBA 是一个运行了多年的成熟、稳定的设备, 而且观测精度已经超过 VERA 的理论值 10 mas, 达到 5 mas 左右。

6.2 东亚 VLBI 网

一个潜在的测量三角视差的网是东亚 VLBI 观测网 (East Asia VLBI Network, 即 EAVN)。EAVN 由位于日本、韩国和中国的, 分布于 6 000 km 范围内的 19 台射电望远镜组成。其覆盖范围从日本小笠原、北海道至中国乌鲁木齐、昆明, 是世界上天线最多和密度最大的 VLBI 阵, 观测灵敏度可以达到亮温度 $10^6 \sim 10^7$ K。2012 年, 上海将建成亚洲最大的全自动 65 m 射电望远镜。如果这个望远镜加入 EAVN, 预计可以观测的 6.7 GHz 甲醇脉泽将超过 1 000 个。如果能很好地消除电离层效应, 对探测银河系 3 kpc 以内

的天体运动学, 以及银河系棒旋结构的起源和演化至关重要, 因为这种脉泽的自身运动很小, 几乎不影响测量恒星形成区的整体运动。

另外, 澳大利亚的 LBA (Long Baseline Array) 正在尝试用 6.7 GHz 甲醇脉泽进行视差测量。因为大多数脉泽源分布在南天, LBA 在研究银河系结构方面将有巨大的潜在优势。另一方面, LBA 和部分 EAVN 天线的合作也将极大地提高测量精度。

6.3 GAIA

欧洲航天局的 GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 预计将在 2012 年升空。在 5 a 的时间里, GAIA 将对银河系内亮于 20 mag 的大约 10 亿个天体进行观测, 确定它们各自的位置、视差距离以及亮度的变化, 由此对银河系的起源、总体几何结构及其运动学和演化历史做全面和彻底的普查。因为 GAIA 工作在光学波段, 银道面上大的消光无疑将严重影响它的观测能力以及测量精度。然而, 如果与 VLBI 观测相结合, 它的缺陷将在很大程度上得到改善。射电观测的视差结果能够在整个银道面不同消光区域对光学观测进行定标。目前 VLBI 视差测量的精度已经达到 GAIA 的理论精度, 而对 GAIA 来说, 只有极少部分亮源才能达到这种精度。通过这两种不同波段观测结果的对比, 将在很大程度上提高光学测量的精度, 使更多的源能够达到甚至超过 GAIA 的理论精度。另一方面, GAIA 海量的观测结果可以内插到与之成协的, 有 VLBI 视差距离的天区内, 从而构造出精细的银河系结构。

预计在未来 10 a 内, VLBI 观测将精确测定 1 000 个左右恒星形成区的三角视差, 而 GAIA 则将得到数以万计天体的视差, 综合两个波段的观测结果, 由此将描绘出真正的银河系旋臂结构以及它的三维运动。随着精准的旋转曲线和暗物质模型的建立, 一个全新的银河系三维物质结构及运动图景将展现在我们面前。

参考文献:

- [1] Oort J H, Kerr F J, Westerhout G. MNRAS, 1958, 118: 379
- [2] Burton W B. Galactic and Extragalactic Radio Astronomy, 2nd Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1988: 295
- [3] Dame T M, Elmegreen B G, Cohen R S, Thaddeus P. ApJ, 1986, 305: 892
- [4] Georgelin Y M, Georgelin Y P. A&A, 1976, 49: 57
- [5] Humphreys R M. ApJS, 1978, 38: 309
- [6] Moscadelli L, Xu Y, Chen X. ApJ, 2010, 716: 1356
- [7] Xu Y, Reid M J, Zheng X W, Menten K M. Science, 2006, 311: 54
- [8] Xu Y, Reid M J, Menten K M, Zheng X W. ApJS, 2006, 166: 526
- [9] Binney J. Science, 2006, 311: 44
- [10] Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. ApJ, 2009, 693: 397
- [11] Mosadelli L, Reid M J, Menten K M, et al. ApJ, 2009, 693: 406
- [12] Xu Y, Reid M J, Menten K M, et al. ApJ, 2009, 693: 413
- [13] Zhang B, Zheng X W, Reid M J, et al. ApJ, 2009, 693: 419
- [14] Brunthaler A, Reid M J, Menten K M, et al. ApJ, 2009, 693: 424
- [15] Reid M J, Menten K M, Zheng X W, et al. ApJ, 2009, 700: 137
- [16] Schönrich R, Binney J J, Dehnen W. MNRAS, 2010, 403: 1829

- [17] Sanna A, Reid M J, Moscadelli L, et al. ApJ, 2009, 706: 464
[18] Xu Y, Moscadelli L, Reid M J, et al. Submitted to ApJ, 2011
[19] Rygl K L J, Brunthaler A, Reid M J, et al. A&A, 2010, 511: 2

Probing the Spiral Structure and Kinematics of the Milky Way with VLBI Techniques

XU Ye

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210009, China)

Abstract: A large project is being carried out by several groups throughout the world. The goal is to reinforce the foundations of models of the spiral structure of the Milky Way by measuring distances directly to regions of star formation across the Milky Way using VLBI techniques. The way is to determine trigonometric parallaxes to strong maser sources, which are associated with regions of star formation and their attendant HII regions. With accurate distances, one should be able to determine the locations of the spiral arms, and produce an extensive map of the 3-dimensional structure of bright material associated with young stars that define spiral structure. In addition to distances, the project also yields excellent measurements of secular proper motions, with accuracies of $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Combining radial velocity measurements with proper motions (and distances) yields full 3-dimensional velocities, relative to the motion of the Sun. Thus, through this project, one will also determine the full kinematics of star forming regions in the Milky Way, which will accurately define the rotation curve of the Milky Way and, in turn, its enclosed mass as a function of Galactocentric radius. Finally, one should be able to show how material in spiral arms actually moves, to characterize the occasional large kinematic anomalies (such as in the Perseus Arm), and hopefully to understand why these anomalies occur. At present, the preliminary results indicate that our galaxy is more massive and spins much faster than previously thought.

Key words: structure of the Milky Way; masers; kinematics