

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

II 类甲醇微波激射天体测量研究

作者姓名: _____ 胡波 _____

指导教师: _____ 鲁春林 研究员 _____

_____ 中国科学院紫金山天文台 _____

学位类别: _____ 理学博士 _____

学科专业: _____ 天文学 _____

培养单位: _____ 中国科学院紫金山天文台 _____

2017 年 05 月

Astrometric Study of Class II Methanol Maser

By
Hu Bo

A Dissertation Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirements
For the degree of
PhD of Astronomy

Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences

May, 2017

学位论文独创性声明

本人郑重声明：我所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及所取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标注引用的内容外，本论文中不含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明或致谢。本人知道本声明的法律结果由自己承担。

作者签名：_____ 日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院紫金山天文台有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院紫金山天文台有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

作者签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘要

银河系旋臂结构与大质量恒星形成过程一直以来是现代天文学研究的热点问题。由于处在银河系内部，我们无法直观的分辨银河系的各个动力学成分。并且由于银道面上广泛分布的尘埃的消光作用，传统的可见光波段观测手段无法展现银河系的真实结构。而随着射电天文学的发展，我们通过多种分子谱线的巡天观测，已经认证了银河系是一个多旋臂的棒旋星系。本人参与的 BeSSeL 项目测量了太阳周围五条主要旋臂的天体测量参数。而对主旋臂上次生的亚旋臂结构，我们仍没有可靠的天体测量结果。可见的银河系旋臂主要由巨分子云构成，其内部的大质量恒星形成区即为旋臂结构理想的示踪天体。而大质量恒星也以其与周边环境强烈的互动而影响了旋臂中的星际介质物理、化学变化，甚至影响了整个星系的演化过程。因此大质量恒星的形成与演化的研究同样对理解银河系结构起到至关重要的作用。然而，由于种种观测限制，我们至今无法透彻理解大质量恒星形成过程。二类甲醇微波激射广泛分布于整个银盘面，是银河系内最明亮的星际介质微波激射源，且其于大质量恒星形成区紧密关联，因此是理想的银河系旋臂结构示踪天体。本文介绍针对 6.7 吉赫兹二类甲醇微波激射源的 VLA 巡天观测和 VLBI 多历元观测。通过大样本（367 个微波激射源）的 VLA 宽频巡天观测，我们得到了微波激射源的谱分布与空间分布图，同时，也获得了大质量恒星形成区的电离氢区连续谱图像。对这些图像的统计分析揭示了 6.7 吉赫兹二类甲醇微波激射源与电离氢区的成协关系。我们发布了北天最大样本的干涉仪成像高精度二类甲醇微波激射星表，及与二类甲醇微波激射成协的电离氢区星表。并且对大样本的空间分布、光度、几何构型做了详细的统计。高精度甲醇微波激射星表将为今后的 VLBI 微波激射视差测量提供选源样本，针对大质量恒星形成区的演化序列研究提供统计样本。我们利用 VLBA 测定了其中三个微波激射源的视差及自行参数，并通过 VLBI 视差测量得到了位于盾牌臂与人马臂之间的银河系亚旋臂结构天鹰座分支旋臂的天体测量参数。天鹰座分支旋臂的螺距角和平均本动都显著大于已知的主旋臂，与目前主流的数值模拟结果一致。本研究首次利用 VLBI 技术测定了银河系内亚旋臂结构的天体测量参数。

关键词： 银河系结构，天体测量，大质量恒星形成，微波激射

Abstract

The structure of our host Milky Way galaxy has been in decades the key problem of modern astronomy. Class II methanol maser is the most luminous and wide-spread species of the Galactic interstellar maser. The most ubiquitous connection between 6.7 GHz methanol maser and the massive star forming region has been proven, thus the 6.7 GHz methanol maser becomes an ideal tracer for the Galactic spiral arms. In this thesis, we introduce the VLA large sample survey and the very long baseline interferometric multiepoch observation towards 6.7 GHz methanol maser sources. We reveal the relationship between 6.7 GHz methanol maser and the H II region hosted by giant molecular cloud, as well the statistic of 6.7 GHz methanol maser properties, such as galactic distribution, luminosity and geometry has been investigated. The largest class II methanol maser catalogue in the northern sky and the catalogue of counterpart H II regions are published. The parallax and proper motion parameters are calculated based on the VLBA multi-epoch observation, with the potential of delineating the astrometric parameters of Aquila spur, a substructure between Scutum arm and Sagittarius arm. The pitch angle and variance-weighted average peculiar motion of Aquila spur are significantly larger than those of major arms. This result is consistent with recent numerical simulations.

Keywords: Galactic Structure; Astrometry; Massive Star Forming; Maser

目 录

摘 要	vii
Abstract	ix
目 录	xi
图形列表	xiii
表格列表	xv
第一章 引言	1
1.1 银河系结构	2
1.2 大质量恒星形成过程与示踪天体	9
1.3 综合孔径成像与甚长基线相位参考观测	10
第二章 II 类甲醇微波激射 VLA 巡天	13
2.1 背景	13
2.2 观测	14
2.3 数据处理	16
2.4 巡天星表	20
2.5 源特性分析	21
2.6 甲醇微波激射形态分类	28
2.7 讨论与总结	44
第三章 甚长基线二类甲醇微波激射视差与自行研究	45
3.1 背景	45
3.2 观测设计	46
3.3 数据处理与结果	50
3.4 视差与自行	57
3.5 讨论与总结	65
第四章 总结与展望	69

附录 A 星表	71
附录 B 微波激射斑光谱与空间分布图与微波激射源与射电连续源叠加图...	75
参考文献	81
攻读学位期间发表的学术论文与科研成果	89
致 谢	91

图形列表

1.1	银河系全波段图像	2
1.2	银河系旋转曲线	5
1.3	三角视差原理	7
2.1	射电连续源图像统计信息	19
2.2	甲醇微波激射源位置准确度估计	23
2.3	甲醇微波激射源在银盘面投影分布图	25
2.4	射电连续源与微波激射源成协关系判定	26
2.5	射电连续源与微波激射源流量关系	27
2.6	微波激射几何构型分类	29
2.7	甲醇微波激射源简单结构样本 (Simple) 的各项分布	30
2.8	简单结构样本范例: G010.724-0.334	31
2.9	甲醇微波激射源复杂结构样本 (Complex) 的各项分布	32
2.10	复杂结构样本范例: G032.991+0.033	33
2.11	甲醇微波激射源线性结构样本 (Linear) 的各项分布	34
2.12	线性结构样本范例: G133.947+1.064	35
2.13	甲醇微波激射源环状结构样本 (Ring) 的各项分布	36
2.14	环状结构样本范例: G035.200-1.736	37
2.15	甲醇微波激射源喷流结构样本 (Jet) 的各项分布	38
2.16	喷流结构样本范例: G012.888+0.489	39
2.17	甲醇微波激射源两极结构样本 (Dipole) 的各项分布	40
2.18	两极结构样本范例: G043.795-0.127	41
2.19	甲醇微波激射源三极结构样本 (Tripole) 的各项分布	42
2.20	三极结构样本范例: G040.425+0.700	43
3.1	VLBI 源银经视向速度图	46
3.2	G059.78+0.06 的第一历元观测在视向速度为 27.00 千米每秒通道的 台站参考相位	52

3.3	G059.78+0.06 第一历元微波激射斑点图	54
3.4	G059.78+0.06 的河外背景源	55
3.5	视差梯度示例	58
3.6	G036.11+0.55 视差与自行	60
3.7	G040.28-0.21 视差与自行	62
3.8	G038.11-0.22 视差与自行	64
3.9	螺距角拟合结果	66
B.1	甲醇微波激射斑光谱与空间分布	76
B.2	甲醇微波激射与射电连续辐射叠加图	78

表格列表

2.1	观测详细参数	16
2.2	未探测到显著信号的 II 类甲醇微波激射源	17
3.1	观测样本详细信息	47
3.2	相位参考观测源	48
3.3	G036.11+0.55 视差与自行	60
3.4	G040.28-0.21 视差与自行	61
3.5	二类甲醇微波激射源 VLBI 测距结果	65
3.6	微波激射源本动	67
3.7	旋臂的平均本动	68
A.1	6.7 吉赫兹甲醇微波激射星表	72
A.2	微波激射斑星表	73
A.3	6.7 吉赫兹甲醇微波激射射电对应体星表	74

第一章 引言

银河系作为太阳的宿主星系，从古至今一直是天文学最重要的观测和研究对象之一。银河系与宇宙中无数的星系类似，是由引力束缚的恒星的集合。在更大的尺度上，星系组成宇宙大尺度结构，而在更小的尺度上，星系又包含诸多星团。但现代天文学普遍认为，星系是构成宇宙的最基本结构。作为我们的宿主星系，银河系以其普遍性为我们对星系形成与演化，动力学，化学的研究都提供了绝佳的观测目标。这将有助于天文学家们理解宇宙的诞生与演化历史。

对于银河系的研究可以上溯到古希腊时期的哲学家德谟克利特，他最早提出天空中肉眼可见的银河是由遥远的恒星组成的。而最终证实银河是由恒星构成的是意大利天文学家伽利略，1610年他首次通过望远镜观察银河，发现连续的光带其实是无数暗弱恒星集合而成的。此后，随着望远镜技术的不断发展，更高分辨率，和更多波段的望远镜在对银河系的研究中起到了至关重要的作用。在对河外星系的研究中，我们可以通过对正向 (face-on) 星系多波段成像，来直接判定星系的形态分类，尺寸，结构，运动状态。但由于太阳系处在银道面上，导致我们无法直接正向观测银河系。而银道面上存在密集分子云或尘埃团块，当我们在地球上以侧向观察银盘时分子云与尘埃将造成严重的消光，导致在可见光波段可见的银盘范围非常有限。为了规避尘埃消光的影响，我们可以采用电磁波的各个波段进行观测。图 1.1 是银河系的全波段图像。在不同的波段下观测，银河系的示踪天体不同，我们在特定的波段下观测银河系的特定成分作为研究银河物理特性的探针。例如，目前通过一氧化碳分子谱线 (Dame, et al., 2001)，中性氢原子辐射 (Burton, 1988)，以及恒星计数的方法 (Benjamin, et al., 2005) 已经可以确定银河系为多旋臂的棒旋星系。然而，侧向观测中，银盘各个成分，各种运动速度都在视线方向上叠加，导致我们无法获得清晰直观的运动学模型。目前对于银河系运动学特性行之有效的研究手段大多依赖间接测量和模型假设，这使得我们对于银河系的诸多物理特性的研究都尚不成熟。

本课题试图通过对大质量恒星形成区的观测与研究来建立对于银河系物理特性更为直观测量手段。恒星是构成银河系的重要成分，其中的大质量恒星 (定义为初始质量大于八倍太阳质量) 更是在起诞生与演化过程中影响着整个星系的物理特性 (Kennicutt, 2005)。在银河系这样的棒旋星系中，旋臂是星系盘上最显著的特征。目前普遍认为，旋臂是由星际介质密度波形成的，因此旋臂上存在丰富的尘埃与气体，为恒星形成提供理想的场所。而大质量恒星形成区，就分布在这些旋

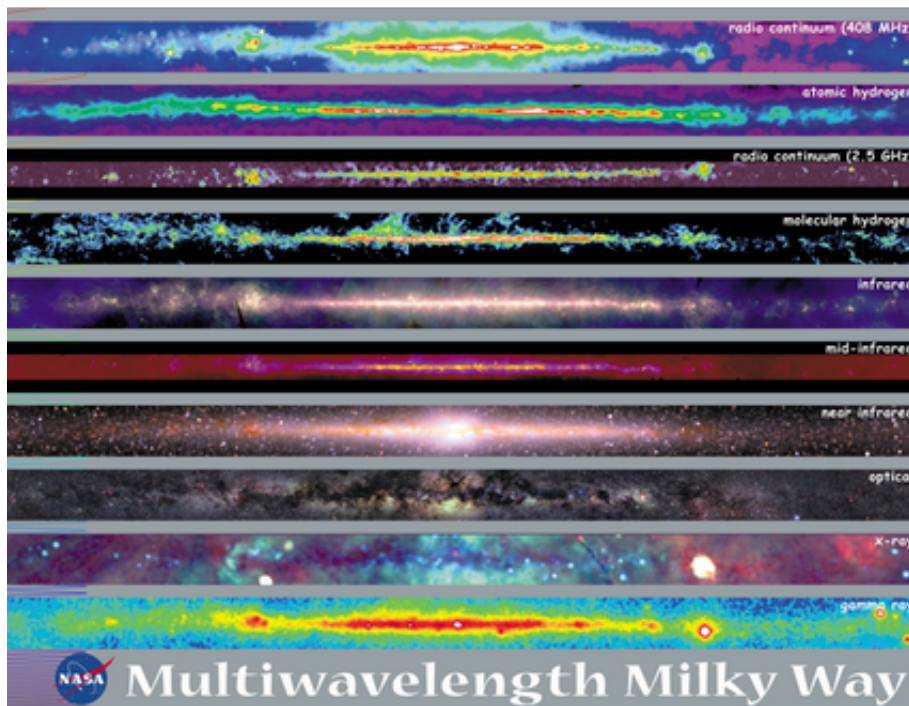


图 1.1: 银河系全波段图像

注释：本图引用自美国航空航天局（NASA）多波段银河项目¹

臂上。因此，对于大质量恒星形成区位置的精确测定以及其演化序列的研究，将有助于我们认识旋臂的各种特性，进而全面的理解银河系的棒旋结构动力学。

在引言章节中我们将从银河系结构、大质量恒星形成、高精度天体测量技术三个方面详细介绍本课题的研究背景。第二章主要讨论通过银盘甲醇微波激射星表及其在大质量恒星形成时间序列研究中的应用。第三张主要讨论甲醇微波激射的高精度天体测量。第四章中将总结本课题取得的研究成果，并展望今后的工作。

1.1 银河系结构

1.1.1 模型

测量银河系结构是天体测量学的最重要的课题之一。由于我们身处在银河系之中，可见的银河系是扁平的。因此无法直观地看到银河系的形状，尺度，和结构。因此，古往今来的天文学家们一直致力于通过各种方法来推断这些特性。早期 William Herschel 通过恒星计数法推断了银河系大致为扁平结构，Harlow Shapley 的球状星团距离推定银河系尺寸，而在与 Harlow Shapley 的大辩论中，Heber Curtis 主张的「宇宙岛」理论最终为人所接受，这使人意识到银河系只是宇宙中无

数星系之一。

银河系模型在我们讨论银河系结构问题时至关重要。模型可以帮助我们解读观测数据。在一定的模型假设下，我们才可能通过特定源的天体测量参数来确定他的位置和运动状态。构建银河系模型，就是要找到一组相关的参数来描述银河系中各种动力学成分的诸多物理特征，例如体积、质量、形状等等。并且通过观测数据来推断这些参数的具体数值。

目前被广泛接受的银河系模型可以分为三类：质量模型 (Mass models)、运动学模型 (Kinematic models)、以及动力学模型 (Dynamical models)。质量模型是最基本的银河系模型，它描绘了银河系内各个组成部分的密度分布。通过这些密度分布，我们可以计算各个成分综合的引力场，并由此通过观测数据来拟合模型中的各个参数。由 Dehnen, et al. (1998) 提出的质量模型中，银河系包含了三个主要成分：核球，盘与晕。其中的盘还可以分为三个不同成分的盘：薄恒星盘、厚恒星盘以及星际介质盘。盘的密度函数可以表示为：

$$j(R, z) = \frac{I_d}{2z_0} e^{-R/R_d - |z|/z_0} \quad (1.1)$$

其中薄厚盘的特征半径是相同的，而特征高度为 $z_0 = 180$ 秒差距和 $z_0 = 1$ 千秒差距。气体盘对于星系面密度的贡献占到 25%，特征半径为恒星盘的两倍，而标高则小于恒星盘 $z_0 = 40$ 秒差距。其中薄恒星盘主要由年轻恒星构成，厚恒星盘主要由老龄恒星构成。但这三种质量成分之间并没有清晰的边界存在。我们目前观测到的银河系旋臂结构通常由分子气体和年轻的大质量恒星构成。因此，本课题的观测样本主要集中在最为扁平的气体盘上。

1.1.2 测距方法

随着天文观测技术的发展，人们通过传统光学望远镜观测，已经有了足够的精度来对银河系尺度上的天体进行测量。但太阳处于银盘之中，而银盘上存在丰富的尘埃云。尘埃的消光作用会影响恒星的亮度和光谱型。因此会在天体测量结果中引入误差。

我们才通过诸如射电波段分子气体 (Dame, et al., 2001) 和中性氢原子气体 (Burton, 1988) 以及红外波段的恒星计数 ?? 等方法最终确认银河系为棒旋结构星系。天体在波长 0.3 mm 到 10 m 范围内的发射，称为射电辐射。它有两个与光学辐射不同的特点，一是射电波能穿透银道面上浓密的尘埃，看到银河系边缘天体的射电辐射，因此，射电望远镜能观测整个银河系银盘上的天体。非常幸运的是，在银河系旋臂上许多天体都有强的射电辐射，特别是来自银河系旋臂上气体的辐射。

第二个重要的特点是，如果观测气体的谱线辐射，射电观测从它接收到辐射强度能推算出在观测方向气体的含量，从谱线的多普勒频移，就能推算出气体红移或蓝移速度。在上个世纪四十至五十年代，天文学家发现中性氢原子气体分布在银河系的每一个角落，这些原子基态精细结构之间的跃迁会产生波长为 21 cm (频率为 1420.4 GHz) 谱线发射，由于 21 cm 谱线有很低的激发能，因此，几乎每一个方向都能看到 HI 辐射，在银河系中 HI 的质量大约有 30 亿个太阳质量，其中大部分集中在银盘上。可能是由于银河系密度波的作用，在旋臂上有较高的密度，于是 HI 是银河系旋臂的重要示踪气体。

但银河系旋臂的精确结构，诸如旋臂的数量以及位置，棒的长度和方向等参数，以及运动学模型，仍需要大量不同波段的观测来测定。但由于太阳处于银盘靠近边缘的区域，我们所见的银河是各种结构成分以及各种运动在视线方向上的叠加。利用观测手段区分这些成分是研究银河系结构的关键要素。

而要精确地示踪银河系的各个结构成分，我们需要大样本、且对某一成分具有独占性的示踪天体。旋臂作为棒旋星系最主要也是最显著的结构特征，一直以来都是银河系结构研究的重要对象。Hou, et al. (2014) 总结了银河系内的电离氢区星表、巨分子云星表和 6.7 吉赫兹二类甲醇微波激射星表，根据运动学距离模型，认证了银河系得四旋臂模型。银河系的旋臂主要由大质量恒星示踪，而大质量恒星寿命周期短，在其演化至主序阶段后仍未驱散周围的分子云。分子云的消光效应使得我们无法利用光学望远镜观测大质量恒星，也就无法在光学波段测定大质量恒星的日心距离。而大质量恒星周边的分子云在红外以及射电波段是光学薄的，因此人们往往利用这些波段的观测来研究大质量恒星形成区。在红外波段可见的巨分子云是大质量恒星诞生的环境，大量观测已经证明，巨分子云可以精确地示踪银河系的主要旋臂 (Garcia-Burillo, et al., 1993; Russeil, 2003; Binney, et al., 2008; Hou, et al., 2009)。而 6.7 GHz 甲醇微波激射与电离氢区同样也与大质量恒星形成区紧密联系。而大质量恒星形成区则精确地示踪银河系旋臂结构 (Binney, et al., 2008)。

根据示踪天体来确定旋臂位置的关键因素在于示踪天体的距离测定。在射电和红外波段，人们通常用运动学方法解算目标源的距离。在银河系中的天体会围绕银心旋转，而根据不同银心半径处天体的绕转速度不同，人们建立了银河系旋转曲线模型。图 1.2 展示了综合各类观测目标所建立的银河系旋转曲线。根据观测而得的旋转曲线，我们可以建立银河系旋转曲线模型，进而推测在银河系任一位置天体的绕银心公转速度。根据这个速度，可推测其相对本地静止标准的视向速度。而我们从观测中获得源的视向速度，则可以根据其银道坐标反推其日心距离。理

论上，如果有准确的旋转曲线模型、天体的银道坐标和视向速度，我们就可以计算得到任何银河系内天体的三维位置。因此这种方法在银河系研究中得到广泛应用。

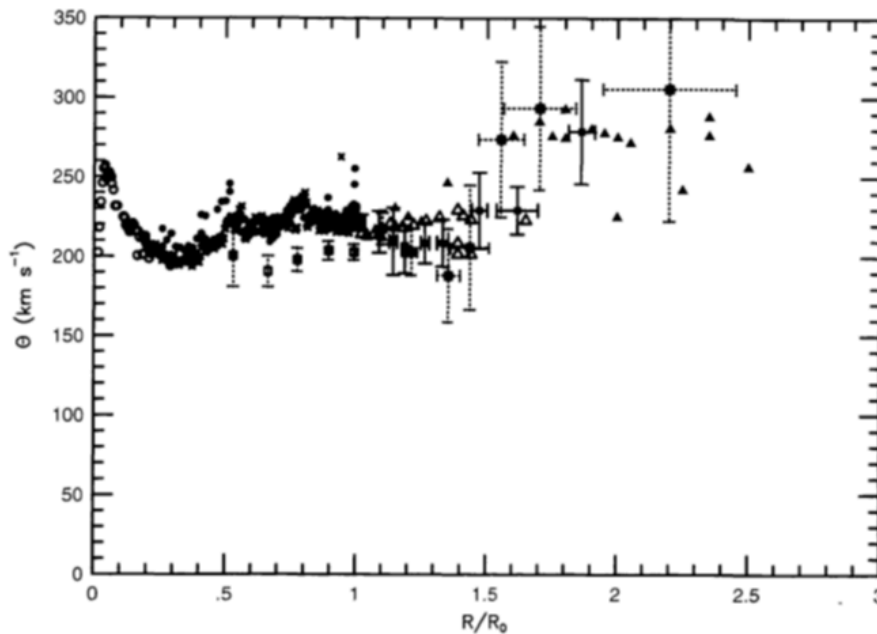


图 1.2: 银河系旋转曲线

注释：本图引用自 Honma, et al. (1997)。其中的数据来源包括中性氢分子，一氧化碳分子，行星状星云，电离氢区等。纵轴为旋转线速度，横轴为目标银心半径与太阳银心距的比值。

但运动学测距方法的缺陷也十分明显。首先这种方法十分依赖于银河系的旋转曲线模型，而目前精确的旋转曲线模型仍然是银河系动力学研究领域的一大难题。特别是在银心半径较大的一端，由于缺乏精确的大样本观测，我们无法给出可靠的旋转曲线模型。其次，在银心和反银心方向，天体运动速度垂直于视线方向，绕银心旋转的速度在视线方向上的投影几乎为 0，因此在这两个方向上测定运动学距离误差会非常大。最后，在内银河系（银心半径小于太阳的区域）视线与天体绕银心轨道相交于两点，而此两点对应相同的视向速度，而从运动学的方法上无法区分天体究竟处于哪一个点上。这种现象被称为运动学距离模糊度（KDA）。KDA 使得我们难以通过运动学的方法解算内银河系天体的距离。对于大质量恒星形成区，人们通常利用中性氢自吸收线来解算运动学距离模糊度 (Anderson, et al., 2009)。但这种方法同样存在误差过大，或者缺乏中性氢谱线数据的问题。

考虑到运动学测距的上述局限性，对于目标的直接测距方法则可以给银河系结构研究提供更加精确可靠的数据。三角视差方法即为对银河系内天体测距的最

精确且最直接的方法。三角视差测距，利用地球绕行太阳的周年运动，在不同时刻观测目标天体对遥远的河外天体的位置差来推算目标天体距离太阳的距离。图 1.3 展示了三角视差的原理。由于地球的轨道运动，在地球上观测目标天体时，如果排除天体自行效应，目标天体在天空中相对于遥远静止天体的运动轨迹将为一个椭圆。通过在一个运动周期，即一年内，的天体运动轨迹上进行合理采样，我们可以构建出以时间为横轴，以视差椭圆在某个方向上的分量为纵轴的正弦函数曲线。而通过在正弦函数曲线上的采样点，我们可以拟合出曲线的振幅，即视差值。而相比于运动学测距，三角视差法来测定大质量恒星形成区的距离有以下优点：一、不依赖任何运动学模型；二、理论上对全天任何方向上的天体都有效。三角视差利用地球绕太阳公转，在轨道的不同位置上所观测天体的相对位置差别来解算天体的距离。这种测距原理直观且不依赖目标天体的运动模型，因此是测量银河系旋臂结构的理想方法。

在实际观测中，我们的目标源为距离 1 千秒差距到 10 千秒差距量级的大质量恒星形成区。而选取的参考源是河外致密射点源。如果要通过三角视差原理来测定，观测这两者的位置精度需要达到 0.1 毫角秒的量级。因此，这也对源的致密性提出了要求。在射电波段，我们使用甚长基线干涉仪来测量大质量恒星形成区的视差。其 1000 km 量级长度的基线在厘米波波段所能达到的最高位置测量精度可以达到微角秒量级。基于三角视差测距原理，Brunthaler, et al. (2011) 提出了 BeSSeL 巡天计划，旨在利用美国国家射电天文台 (NRAO) 的甚长基线干涉阵 (VLBA) 观测分布在银河系旋臂中的大质量恒星形成区所包含的星际介质微波激射源。通过多历元测定其相对河外射电参考源的位置，而解算出大质量恒星形成区的距离与三维运动，进而测定银河系旋臂，计算银河系基本运动学参数 (Reid, et al., 2009b, 2014)。

1.1.3 BeSSeL 计划

BeSSeL 计划的目标是通过对大样本的大质量恒星形成区测距，从而通过测距结果研究银河盘上的旋臂结构分布，以及旋臂的天体测量参数，并且进而通过通过大样本的运动学数据拟合得到银河系的运动学基本参数。BeSSeL 计划选择的观测目标是甲醇与水分子的微波激射源。选取这两种微波激射源有如下理由：一、此两种微波激射源与大质量恒星形成过程高度呈协，出现这两种微波激射源的区域一定为大质量恒星形成区。二、此二种微波激射源亮度高，且非常致密。上文说过，要测量银河系内的大质量恒星形成区的三角视差，观测位置精度应达到 0.1 毫角秒的量级，在射电波段上，我们可以采用甚长基线干涉的原理来进行观测。甚长基

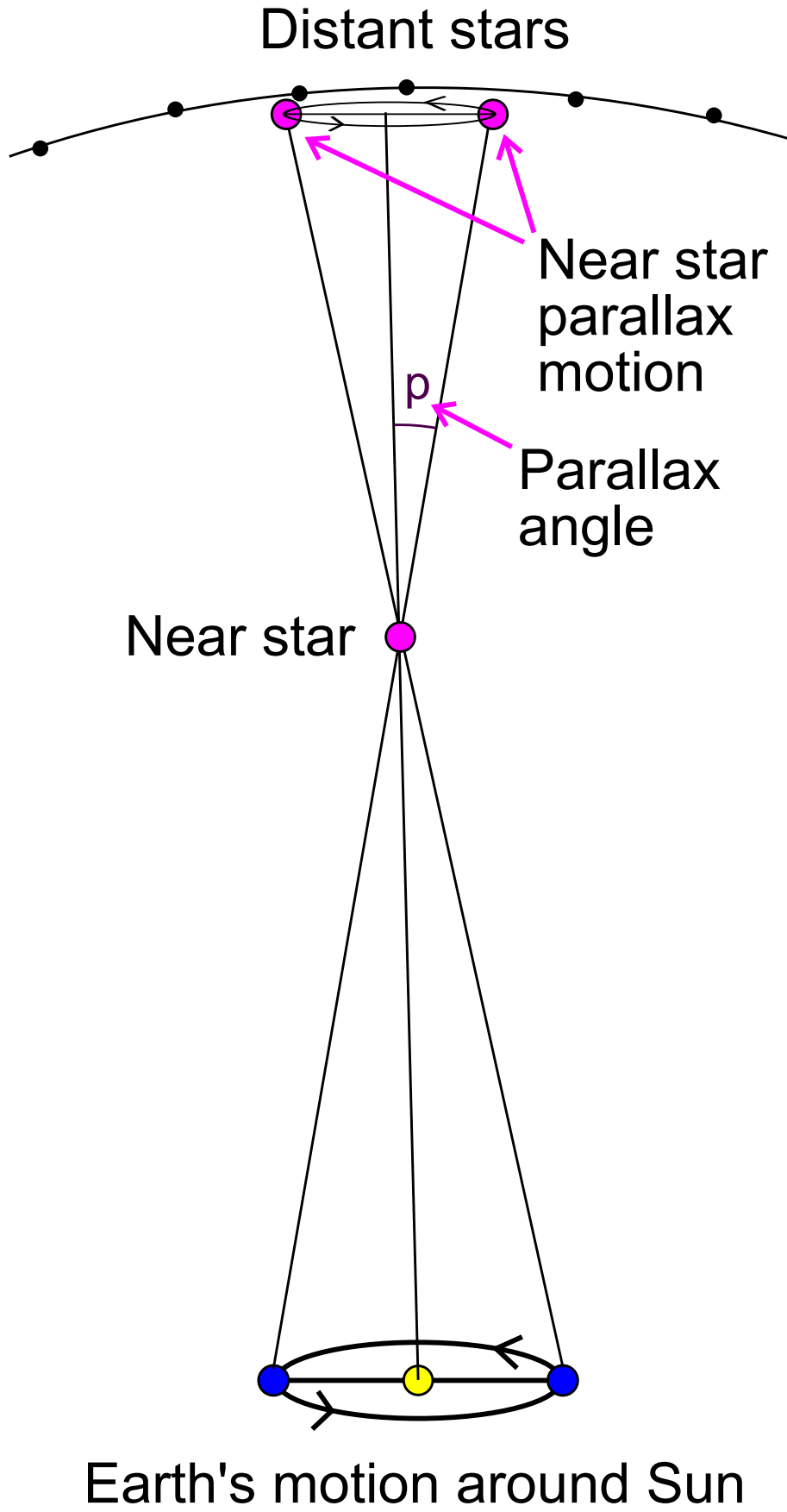


图 1.3: 三角视差原理

线干涉可以为观测提供数千公里的基线长度，但由于仪器限制，甚长基线干涉往往缺乏短基线，因此无法观测延展的天体。综合以上两种因素，微波激射源是理想的 BeSSeL 观测目标天体。

BeSSeL 计划从 2005 年开始首次观测，截止至目前，观测了 6.7 GHz 甲醇微波激射，12 GHz 和 22 GHz 水微波激射，共 122 个源。BeSSeL 计划的主要观测仪器是美国国家射电天文台的甚长基线干涉阵 (VLBA)。VLBA 由分布于美国本土与夏威夷与波多黎各的十台十米口径的射电望远镜组成，最长基线可达 8611 千米 (Mauna Kea 至 St. Croix)。由于北天的观测限制，所观测的目标主要分布在银河系的第一、二、三象限内。BeSSeL 计划对所有微波激射源都进行多历元观测的相位参考观测。多历元观测是为了保证有足够多的数据点来拟合最终的视差自行曲线。为了得到可靠的视差拟合结果，对一个微波激射源在一个视差周期 (一年) 内最少需要进行四次观测。其中两次取在视差正弦曲线的波峰，两次取在波风相邻的两个波谷上。这种采样方法，能将视差曲线拟合的信噪比增至最大。并且，利用最少四个的采样点，我们可以同时拟合视差与自行。结合射点观测中，通过谱分析得到的微波激射源视向速度，我们则可以得到任一个微波激射源的三维位置与三维速度。在拟合视差曲线时，最少四次观测，将提供八个数据点，而同时拟合视差与自行，需要三个参数，因此在拟合中存在五个自由度。

有利用已经观测的微波激射源的视差与自行，BeSSeL 团队已经得到了银河系五条主要旋臂 (盾牌臂，人马臂，本地臂，英仙臂，外围臂) 以及银心核球区域以及 4 kpc 区域的天体测量以及运动学结果，并且依靠测距结果，更新了银河系的基本常数：太阳的银心半径 R_0 以及本地静止坐标系的轨道圆运动速率 Θ_0 。

1.1.4 天鹰分支旋臂

主旋臂上的次级旋臂结构在河外漩涡星系中十分常见。不论旋臂数量和旋臂分布，各种漩涡星系中都存在次级旋臂结构 Lynds (1970); Elmegreen (1980); La Vigne, et al. (2006)。以 M51 星系为例，其为标准的正向 (face-on) 漩涡星系，在由哈勃空间望远镜拍摄的高精度光学红外图像中，我们可以清晰地看到即是在宏观漩涡结构上存在丰富的次级旋臂结构。因此，我们本能地想要研究在银河系中是否也存在这样的次级结构。而前人已经证明了，在银盘上存在数量可观的次级结构 (Weaver, 1970b; Tamanaha, 1994)。但对于银河系内次级结构的天体测量参数仍然缺乏有效的测量。

在银河系结构的研究领域，我们已经有了许多对于主要旋臂结构的研究与讨论，而相比于对于银河系主要旋臂结构的探索，人们对于次级旋臂结构仍缺乏足够

的了解。在过去的十多年间，BeSSeL 和 VERA 团队已经对通过高精度天体测量观测，对银河系主要旋臂进行了天体测量研究。通过氢原子气体 (Weaver, 1970a) 和一氧化碳分子气体谱线 (Cohen, et al., 1980; Dame, et al., 1986)，我们已经证认出了银河系的主要旋臂结构。在这个基础之上，高精度天体测量观测则详细测定了各旋臂的天体测量参数，并为我们提供了旋臂分布的总览图 (如 Reid, et al., 2014, 图一)。尤其在第一象限内，大量的观测数据支持了多旋臂结构的银河系模型。尽管银河总体结构日趋明朗，但次级旋臂结构的测量仍然是空白。

天鹰座分支旋臂最初在一氧化碳分子谱线巡天 (Cohen, et al., 1980; Dame, et al., 1986) 被首次发现。在银经-视向速度图上，天鹰座分支旋臂的区域银经覆盖范围很小，只有五度左右，而视向速度则保持在 80 千米每秒左右。在 Reid, et al. (2016) 的图一中，他们提出的银河系旋臂模型中包括了天鹰座分支旋臂，从盾牌臂上分叉产生，一致延展到人马臂的近端。

在本课题的研究中，我们发现观测样本中有三个大质量恒星形成区落在了银经-视向速度图的天鹰座分支旋臂位置，因此，我们推断通过这三个源的天体测量结果，有可能证实天鹰座分支旋臂的存在，并且推算出其天体测量参数。

1.2 大质量恒星形成过程与示踪天体

虽然大质量恒星在银河系中数量很少，但它们在许多天体物理过程都起到了重要作用。星际介质形态，恒星形成速率，以及星系演化过程等等，都不同程度地受到了大质量恒星的影响 (Kennicutt, 2005)。因此，大质量恒星的形成与演化的研究，一直以来都备受关注。大质量恒星诞生于巨分子云之中，并且演化时标非常短，在整个诞生初期都被包裹在浓密的尘埃与气体包层中。而由于包层强烈的消光作用，我们很难直接观测其中心的大质量恒星。同时，大质量恒星的分布距离太阳很远，且演化时标短，造成可观测样本非常有限。因此，直到如今，大质量恒星的形成过程仍是天文学领域中一个亟待研究的重要课题。然而，大质量恒星在形成过程中不断影响着其周边环境。通过对周边环境的观测，我们可以获得相当丰富的信息。因此，虽然大质量恒星本身被遮挡难以观测，我们却能通过观测其周边环境示踪天体的物理、化学状态来推测大质量恒星的形成于演化过程。

在大质量恒星形成区中，存在相当丰富的示踪天体可供各个波段观测。例如大质量致密云核 (Zinnecker, et al., 2007); 红外暗云 (Kauffmann, et al., 2010); 中红外辐射源 (Purcell, et al., 2013); 延展绿色天体 (Cyganowski, et al., 2008); 分子外流 (Beuther, et al., 2002); 星际介质微波激射 (Farmer, 2014); 致密电离氢区 (Churchwell, 2002) 等等。通过研究这些天体的性质与状态，将有助于我们理解

年轻大质量恒星的演化序列。在这些天体中，星际介质微波激射，主要是羟基微波激射、水分子微波激射和甲醇微波激射，长期以来被视作绝佳的大质量恒星形成过程示踪天体。其中由 Menten (1991) 首次发现的 6.7 GHz 甲醇微波激射是银河系中强度最大的星际介质微波激射。6.7 GHz 甲醇微波激射和 22 GHz 水分子是大质量恒星形成区中最常见的两种星际介质微波激射源 (Caswell, et al., 1995; Minier, et al., 2003; Xu, et al., 2008)。它们同时也是大质量恒星形成过程最普遍和最早期的示踪天体 (Urquhart, et al., 2015)。致密电离氢区则是形成初期的大质量恒星的最好示踪天体 (Hoare, 2005)。在大质量恒星形成的晚期阶段，被分子气体包裹的中心 OB 型恒星开始辐射高能紫外光子，并电离其周边的中性氢气体，形成致密电离氢区。等离子体产生的热轫致辐射可以在射电波段的光深远小于 1，因此可以被直接观测到。近年来，有许多针对致密电离氢区的观测。Urquhart, et al. (2009) 等人利用美国国家射电天文台的甚大干涉阵 (VLA) 在 4.9 GHz 波段观测到了 659 个致密电离氢区候选源。在 $0.2 \text{ mJy beam}^{-1}$ 的灵敏度下，其中有 391 个被确认为致密电离氢区。同时，也有许多观测已经证明致密电离氢区与 6.7 GHz 甲醇微波激射存在成协关系 (Caswell, 2009; Caswell, et al., 2010; Sanna, et al., 2010)。根据 Davies, et al. (2011); Mottram, et al. (2011) 等人的研究，致密电离氢区标示的是大质量恒星形成区演化过程的最后 10^5 年，通过观测致密电离氢区，将有助于我们了解大质量恒星形成区的晚期演化。

1.3 综合孔径成像与甚长基线相位参考观测

综合孔径技术是干涉仪成像的基本原理。在射电波段的天文观测中，由于接收机的体积限制，很难利用单个望远镜成图观测。传统的单天线射电观测只有频谱分辨率，而没有空间分辨率，这极大的限制了其在天文学各项研究领域的应用。如果需要利用单天线射电望远镜对某个区域成图观测，只能通过逐点扫描的方式覆盖目标天区。而这种方法的观测效率较低，往往不能胜任需求高空间分辨率和大天区覆盖的研究应用。现代天体测量领域的前沿研究对观测精度要求已经达到了亚毫角秒量级，这对射电波段的观测手段提出了巨大的挑战。根据衍射理论，望远镜的角分辨率可以近似表达为： $\theta \sim \lambda/D$ 。其中 θ 为望远镜角分辨率， λ 为观测波长， D 望远镜口径。因此要在波长为厘米量级射电波段得到亚毫角秒量级的角分辨率，望远镜口径需要达到千公里量级，而目前世界最大口径的望远镜 FAST 尚只有 500 米。综合孔径技术很完美的规避了射电观测的以上两个不足之处。利用多个望远镜接收到的射电信号相干涉，我们可以构建观测信号的 UV 平面。每两个射电望远镜构成一条观测基线，对应 UV 平面上一个信号点。而 UV 平面与