

微角秒级的天体测量技术 及其在天文学研究中的意义

徐家岩

提 要

近十年来由于光干涉测量技术的成功,使得天体测量的观测精度有了戏剧性的提高。在大角度天体测量方面,Mark III 光学干涉仪已能以毫角秒级的精度测定恒星的位置。在窄角天体测量方面,将来地面上的长基线红外干涉仪,如Keck干涉仪阵,具有 $10\mu\text{as}$ 级观测精度的潜力。目前美国正在实验的小型空间光学干涉仪,将能达到微角秒级的测量精度,它会给天文学研究带来重大影响,使人类对天体和宇宙的认识向前跨进一大步。

一、概 述

天体测量学不但是天文学发展的基础,也是天文学中最古老的一个分支。天文学的孕育和发展首先是从天体测量开始的。早在公元前240年,希腊人就测定了地球是球形的;公元前120年伊巴谷由月球视差的观测推算出了地月之间的距离,此后他还发现了岁差现象。更早期的日、月食的记录,以及后来由农牧活动而发展起来的历法和它的不断改进和完善,都是天体测量学的萌芽和开始。正是由于古代的和近代的人们对天象变化和日、月、星辰运动的兴趣,以及这些现象与生产实践的密切关系,才促进了人们对天体进行更进一步的观测和研究,并由此引发现代天体力学和天体物理学的发展。这样人类便由单纯的对天体的几何位置的观测和研究,进入到对运动的力学机制、天体的本质、演化过程和机理等天文学各领域的全面研究。现代天体测量学已经发展成能使用不同方法、不同技术、不同波段和不同仪器来测量和研究天体的距离、位置、运动、大小和质量等表征天体较全面的特性参数的一门较综合的学科。用天体测量方法所测量的这些量为整个天文学的研究提供了最基本、最直接的资料,而且天体测量测定这些量的精度越高,天文学家对天体和宇宙的认识就越深入。

在光学望远镜发明之前用肉眼观测的时代里,天体测量观测精度的提高是十分缓慢的,如图1所示^[1]。自1609年伽利略发明了望远镜之后,观测精度的提高变得十分迅速,平均每个世纪提高一个数量级以上,特别是在最近200年中,提高了三个数量级。应该强调指出的是,由于空间技术(伊巴谷卫星, HST)的成功和在射电、光学波段干涉测量的成功,使得在短短的十年中,观测精度提高了一个多数量级。更值得庆幸的是,在今后二、三十年中,地面长基线光学干涉测量和空间光学干涉测量(如POINTS)又将把天体测量的精度由

伊巴谷卫星的 2mas (毫角秒)提高到微角秒级乃至亚微角秒级。这种高精度的位置、自行和视差(距离)的测定结果,将会使天文学各个领域里的研究翻开新的一页。

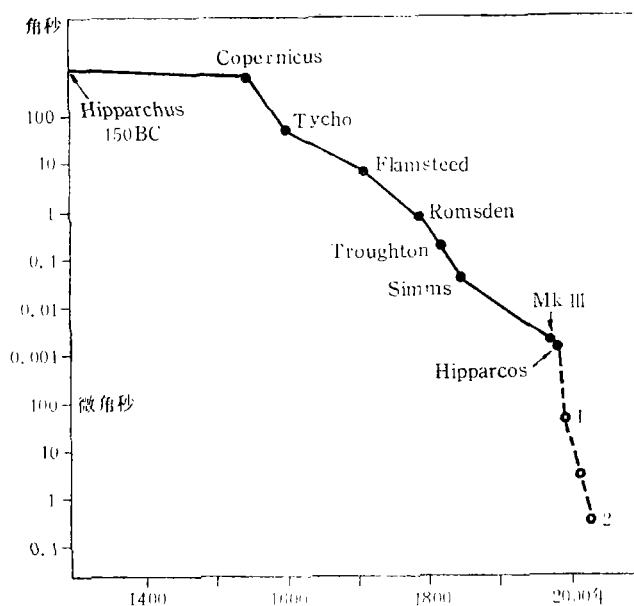


图 1 天体测量观测精度随时间的变化

本世纪七、八十年代,射电干涉技术,特别是 VLBI 技术的成熟和完善,可将射电源的位置测定到亚毫角秒级的精度。但这仅限于对有射电辐射的天体位置的测定。对光学天体,直到 80 年代后期,美国 Mark III 光学干涉仪的成功,才首次在地面上将光学天体的位置测定到毫角秒级的精度,比地面上的经典光学仪器(如子午环、等高仪等)提高约一个数量级。目前美国海军天文台(USNO)正在研制的下一代专用天体测量光学干涉仪,能以几毫角秒的精度测定全球范围内的天体的位置。这种地面上的干涉测量技术能达到和空间伊巴谷卫星相比拟的测量精度,不愧为天体测量史上的一次革命。另一类地面上的光学干涉技术可进行窄角的天体测量,相对于校准星可把光学天体的位置测定到 $10\text{--}100\mu\text{as}$ (微角秒)的精度。预期本世纪末或下一世纪初,这一高精度的结果就可用于天文学研究中(图 1 虚线上的点 1)。最近欧洲空间局准备研究一种小型空间光学干涉仪,预计下一世纪初发射,其主要目的是对天体进行成图,但也能把光学天体的位置相对参考星测定到 $10\text{--}100\mu\text{as}$ 的精度。特别有潜力的是美国目前正在实验研究的一项空间光学干涉仪,即 POINTS,它能以 $2\mu\text{as}$ 的精度测定几千颗星的位置、年自行和视差;而且对几百颗特别有意义的天体进行加强观测,可达到亚微角秒级的精度(图 1 虚线上的点 2)。这些高精度的观测资料应用到天文学研究之后,将会使人们对宇宙的认识大大向前推进一步。

二、微角秒级的天体测量观测技术

由于干涉测量技术和空间技术的兴起和发展,使得现代天体测量可以分成更多的分支。

比如,按工作模式分,可分为传统单望远镜方式和干涉测量方式;按天区覆盖可分为全天空(广角)的和窄角的;按仪器状态可分为地面的和空间的;按接收信号波段可分为射电和光学(包括红外)的。在这几种划分中,干涉测量精度高于传统单望远镜的,空间天体测量精度高于地面的。空间技术和干涉测量技术相结合,能获得最高的天体测量精度。

由于空间没有大气和重力的影响,空间天体测量精度主要受光子统计误差的限制。当干涉仪的基线比单望远镜口径大很多时,光子统计误差对干涉测量的影响就大大减小,基线长度对干涉测量精度的提高起了重要作用。地面上天体测量精度主要受大气湍流的影响,当干涉仪基线变得很长时,大气湍流的影响也大大降低,因而长基线干涉仪的观测精度会比单口径望远镜有 1—2 个数量级的提高。例如美国 Mark III 光学干涉仪已经获得 $\bar{\sigma}_a = 9.2 \text{ mas}$ 、 $\bar{\sigma}_b = 5.6 \text{ mas}$ 的高精度的天体测量结果^[3]。

1. POINTS^[4,5]

POINTS 是由基线为 2m 的两对光学干涉仪组成,它们光轴之间的夹角约为 90° ,口径为 25cm。天体偏离干涉仪光轴的角度由干涉条纹相位来测定,两干涉仪光轴之间的夹角用精度为 10pm 级的双频激光干涉仪来测定,因而它能以极高的精度来测定天体的位置。比如对一对 10mag 星,观测 10 分钟,预计能达到 $5 \mu\text{as}$ 的精度。

POINTS 计划对 300 颗恒星和 5 颗类星体进行每季度一个月的加强观测,10 年后这些天体的位置、年自行和视差可分别测定到 0.6、0.2 和 $0.4 \mu\text{as}$ 的精度。其余时间将对另外 7 000 个天体进行扩充观测,可将上述系数测定到 $2 \mu\text{as}$ 的精度,并且所得到的视差是绝对的。POINTS 的极限星等为 17mag,寿命为 10 年。

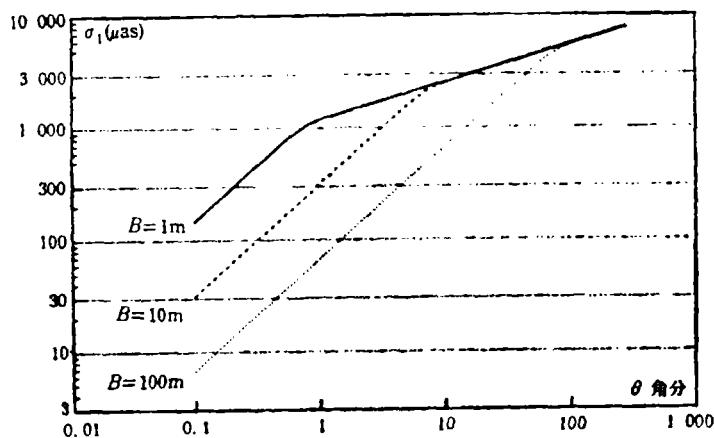


图 2 长基线红外干涉仪观测精度 σ_1 和基线长度 B 、角距离 θ 的关系

2. Keck 干涉仪阵

世界上第一架 10m 口径的光学望远镜,即 Keck 望远镜,正在夏威夷安装,美国还计划再造一面 10m 和 4 面 1.5m 的光学望远镜,组成 $2 \times 10\text{m} + 4 \times 1.5\text{m}$ 的 Keck 光学干涉仪阵,预计本世纪末这个阵能投入工作。

Keck 干涉仪阵的主要目的是对天体进行成图,但可用它在红外波段进行高精度的窄角天体测量,利用红外波段进行窄角天体测量的一个优点是,在不使天体被分辨时,基线可以

做得相当长,从而使其能达到微角秒级的测量精度。根据大气特性资料计算表明,地面长基线干涉测量的误差 $\sigma_I \propto B^{-2/3}(t^{-1/2})$ 和 $\sigma_I \propto \theta^{1/3}$ 。 σ_I 和基线长度 B 以及 θ 的关系表示在图 2 中。由图可见,当基线 $B \geq 200\text{m}$, $\theta = 15''$ 时,对暗至 13mag 的目标星,积分一小时能达到 $10\mu\text{as}$ 的精度。要达到这样的测量精度,要把仪器的系统误差控制在一个很小的范围内。比如基线的长度要监测到 100μ 以内,延迟线的补偿要精确到 10nm ,这两项要求美国均已在实践上达到。用红外长基线干涉仪进行天体测量的另一个优点是,允许使用更暗的参考星,比如目标星为 13mag 时,参考星可暗至 17.5mag(K) 或 20.5mag(V),因而在待测星不远的地方就容易找到参考星。

3. 其他的光学干涉仪

目前国际上正在建造的几架光学或红外干涉仪,稍加改变后即可进行微角秒级的窄角天体测量。其中有众所周知的 ESO 的 VLTI, USNO 和 NRL 的一项联合(AOI 和 BOA)计划,以及 Georgia 大学正在研制的 CHARA 计划,都可修改成能从事窄角天体测量的干涉仪,精度可好于 $100\mu\text{as}$ 。

目前 JPL 正在实验另一项轨道干涉仪计划,除了成图外,也能对暗至 20mag 的天体进行广角的天体测量观测,星位测定精度可达 $10\mu\text{as}$ 。欧洲空间局(ESA)也在考虑一项小型空间干涉仪计划^[6],也可对暗于 13mag 的天体进行窄角天体测量,精度可达 $10-100\mu\text{as}$ 。

三、高精度天体测量观测的意义

1. 建立高质量的空间参考系

对天体的位置和自行高精度的观测,可以建立高精度的空间参考系。建立高精度的空间参考系是天体测量学最基本、最重要的任务,也是天文学、大地测量、航天等许多科学研究部门研究工作的基础。

在实践上,空间参考系通常是用一本基本星表来体现的。目前能代表空间参考系的最好星表是 FK5。不论在位置精度、星数、星等范围、系统的均匀性等方面,它都远远满足不了现代天文学研究的需要。

伊巴谷卫星的成功观测将会使这种局面大大改观。通过近三年的观测,能以 2mas 的精度测量出 12 万颗恒星的位置、年自行和视差,最暗可达 13mag,大部分亮于 11mag。用这种结果所建立的空间参考系,没有区域性的误差,是全天均匀性、一致性都很好的空间参考系。由于伊巴谷卫星的自行精度有限,要真正发挥它的作用,应在 10 年后再发射第二颗伊巴谷卫星,从而把伊巴谷星表的自行精度提高 10 倍以上。否则它得到的星表的精度将很快降到 FK5 的水平。

前面已提到,美国目前正在实验研究的空间光干涉仪 POINTS,在空间进行约 10 年的观测后,可建立微角秒级的空间参考系,最暗为 17mag 星。计划对 300 颗恒星和 5 颗类星体进行较密集的重叠观测,可使它们的位置、年自行和视差的精度分别测定到 0.6、0.2 和 $0.4\mu\text{as}$;而对另外 6 000—7 000 颗星进行稀疏观测,可将它们以上三个参量分别测定到 $2\mu\text{as}$ 的精度。这样建立起来的空间参考系,不仅可为天文学使用几十年而精度不会降低,

而且可为地面上和其他的空间干涉仪进行 10—100 μ as 精度的窄角天体测量提供精确的参考星, 并以此加密用 POINTS 建立起来高精度空间参考系。由于 POINTS 计划以亚微角秒的精度观测 5 颗类星体, 它所建立的空间参考系是和惯性系相联系的。这种惯性系特别有利于研究要求整体运动是绝对运动的某些课题, 如银河系的自转及较差自转; 星群的运动、旋臂等; 恒星的总体运动特征; 与银道面垂直的运动的统计工作。这种惯性参考系对地球动力学及太阳系方面的研究, 如: 建立动力学参考系(行星—月球)与几何绝对系统之间的联系; 获得月球运动中的非引力效应以及对于所有天体的相对论性效应; 建立测量岁差的参考系(岁差是地球内部结构的最敏感的指示器之一); 建立研究极移长期项的参考系; 建立研究在行星运动中的长期效应的参考系(这种长期效应可用来决定行星的质量), 都是相当重要的。

2. 高精度视差资料的获得和应用

除了使用干涉测量方法外, POINTS 测定天体位置、自行和视差的原理与伊巴谷卫星相似, 通过夹角约 90° 的两干涉仪在全天连锁闭合地重复观测相距约 90° 的两天体之间的角距离, 就可解得所观测的天体的两个坐标。由不同历元上的位置观测可获得自行, 由地球公转轨道不同位置上的观测可获得视差, 而且这种视差为绝对的。所能达到的精度和观测次数、历元跨度等有关。

(1) 造父变星绝对星等零点的校准

利用造父变星(包括天琴 RR 型变星)求星系的距离是最常用和最基本的方法, 也是最准确可靠的方法。测定更遥远星系距离的其他方法也是直接或间接地建立在这种方法测定结果的基础之上的。由于在地面上能用于绝对星等定标的三角视差的作用距离只限于 20pc 以内, 而用于校准宇宙距离的造父变星都在 2—3.2kpc 之间, 故这些造父变星的距离没有一个是用三角视差法直接测定出来的, 即使伊巴谷卫星也远不能达到这个距离上。传统上这些造父变星的距离, 都是通过毕星团及其成员距离的测定和主序星的测光而间接地得到。毕星团距离的测定, 除了利用星团视差法外, 还可利用三角视差、力学视差等方法。但各方法之间的弥散度颇大, 所得距离从 41.7 到 46.9pc 不等; 即使是同一种方法, 所得结果也有 3—4pc 的差异。最近潘小培等人利用美国 Mark III 光学干涉仪通过双谱分光双星的观测, 得到毕星团的距离为 $43.7 \pm 1.9\text{pc}$ ^[7]。虽然以上各种方法测定毕星团距离的相对精度都能达到或好于 5%, 但以此推得的造父变星的距离实际上具有 15% 的不确定性。由于 POINTS 具有微角秒或亚微角秒级精度, 可对这些校准星系距离的(约 20 颗)造父变星和其他造父变星的距离进行直接的测定, 相对精度可好于 1%, 从而可使银河系内距离标尺的校准精度提高一个数量级, 同时观测对象的类型也增加一个数量级。由于银河系内造父变星距离的测定精度有一个多数量级的提高, 由造父变星周光关系所得到的河外星系的距离精度, 从而导致各级宇宙距离标尺的精度都大大提高。

(2) 天琴 RR 型星绝对星等零点的改进

在中等的河外距离上, 天琴 RR 型星可提供非常重要的一致性检验。但在某些情况下, 比如到大、小麦哲伦星系的距离, 几乎唯一地由天琴 RR 型星的标尺来推得。而目前天琴 RR 型星的绝对星等的不确定性将近 0.2mag。POINTS 通过对河外几百颗天琴 RR 型星的三角视差的直接测定, 可把星等零点的精度提高 5 倍以上。

(3) 类星体距离的检验

这方面的情况已在文献[10]中作了介绍, 此处省略。

(4) 哈勃常数的改进

更遥远星系的距离测定都是建立在哈勃定律的基础上的, 因此哈勃常数的确定对于宇宙距离标尺和宇宙距离的确定都是至关重要的。过去哈勃常数的测定都是基于银河系内星团和造父变星距离的测定。在过去的半个世纪里, 哈勃常数变小了 10 倍。最近二、三十年来, 由于毕星团距离的修正, 也最终导致哈勃常数从 55 下降到 50^[9], 从而宇宙的尺度也因此增大了近 10%。虽然哈勃常数的测定已作为 HST 的首要任务, 但解决这个问题的关键是造父变星和天琴 RR 型星“标准烛光”的确定。如前所述, POINTS 的观测可使它们的距离精度提高一个多数量级, 由此建立起来的第二级以及更高级的距离尺度精度也会大大提高, 从而可推得更精确的哈勃常数。由于哈勃常数不但用于确定遥远星系的距离, 也用来估算类星体的距离。因此精确测定哈勃常数对河外星系天文学和宇宙学的研究都有十分重要的意义。

(5) 银河系的结构和物质分布的研究

用 POINTS 在整个银河系范围内对固有发光度大的星, 如造父变星或 O 型星, 进行观测, 能精确确定在它们的光谱中具有星际吸收线的恒星的距离, 可对不同温度的星际介质分布来成图, 并能估计不同路径上红化和消光之间的关系。

年轻的大质量恒星, 如像 OB 星、W-R 星、造父变星等, 常被用于描绘旋臂的结构, 以及检验它与恒星形成区的关系。用 POINTS 可直接测定这些天体的距离, 从而回避掉了绝对星等和光谱型之间的不确定的关系, 也回避掉了这些星的不确定的红化, 因此能使我们看清主旋臂的全部, 同时能对由密度波引起的恒星自行进行测定。

POINTS 对激发 H II 区的恒星距离的测定, 以及对银河系质量分布的研究也将做出重要贡献。同时, 它的观测结果能够证明极其重要的银河第三个视分量“厚盘”的存在, 并能推导出它的高度。

用 POINTS 对球状星团的视差进行测定, 精度可比目前提高近一个数量级, 从而把观测到的颜色—星等图置于一个绝对的标尺上, 从而避免了校准时依赖于不确定的恒星演化模型。

(6) 银河系天体的研究

由于 POINTS 具有高精度的潜力, 可在惯性参考系中测定双星两个成员的轨道, 从而定出每个子星的质量; 而且可以利用(具有高自行的)前景星引起背景星的光线偏折, 提供弧星质量测定的新方法。

恒星的质量、发光度、化学组成以及年龄之间的关系, 是恒星天体物理研究的基本问题之一。目前仅对比较少的和最靠近的恒星得到了, 但光谱型的覆盖尚欠缺, 自零龄主序星演化了多远也不确定。高精度的视差观测可使被研究的空间体积增加百万倍, 能包容比较全面的样本, 从而更全面地检验恒星演化模型。把恒星的绝对星等与质量测定和其他资料相结合, 会使质量—颜色—发光度的关系更准确。同时可以对特别有意义的恒星进行观测, 比如认为是银河系边缘最亮的星船底座 η 星的距离的测定, 被疑为拥有一个黑洞为伴星的天鹅座 X-1 星进行观测, 都会对天文学研究作出重要贡献。此外, 这类高精度观测资料的获

得, 可以揭开银河系研究中的几个谜, 如像离银道面很远处出现看上去是很年轻的 B、A 型星等等。

3. 高精度的自行资料的应用

(1) 确定附近星系及其星团的自行

由于 POINTS 所建立的空间参考系, 既是刚性的, 又是和惯性系相联系的。因而在这种参考系中观测到的星系和它们中星团的自行是绝对的。M31 处于 600kpc 的距离上, 由它的自转给出的视自行 $35\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。用 POINTS 观测 10 分钟就可将它里面的星团或亮星测定到 $几\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的精度。给出在 M31 盘里天体在天空平面里的视自行速度, 再以 $0.4\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的精度测定自行, 就能把远达 600kpc 的这个星系的距离测定到 1%。此外, 如果自行精度能达到 $1\mu\text{as}/\text{yr}$, 就能以 $3\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的精度测定 M31 的切向运动。本星系群中其他成员的运动能以相似的精度测定, 从而给出本星系群的全部六维的情况。有了这些资料就可以更好地估计本星系群的角动量, 这种角动量和星系的形成有关系。

(2) 银河系的运动和质量

POINTS 能对远达 10kpc 的恒星以 10% (对加强观测为 1%) 的相对精度测定它们的距离和以 $0.2\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的不确定性来测定它们在惯性系中的速度。这些测量不仅能更好地估计银河系质量作为半径的函数, 而且也能给出银晕速度椭球的估计。遥远恒星和球状星团的真实的空间速度能用于银河系轨道等许多课题研究。有了空间速度和距离的精确测定之后, 能回答许多关于银河系的形成、演化、质量分布等方面的问题, 比如在银河中是否存在能表明通过聚合原星系而形成银河系的这种运动着的子系统。

对大、小麦哲伦星系的空间速度的测定, 能更好地得到银河系的总质量, 并检验银河系包含有一个大的“暗物质”分量的说法。如果银河系中没有这么大的物质分量, 大麦哲伦云就以 $15\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的速度向东运动; 如果有, 它运动得更快。由于这两个星系中都含有亮到 11mag 的星, POINTS 能在均匀的惯性系中以更高的精度测定这两个云的运动, 上述的疑问便能得到肯定的回答。此外, 对这两个云中的几百颗亮星的观测, 除能研究它们的质量和速度分布外, 还能大大改进它们的距离估计。

(3) 球状星团

银河系中球状星团距离和自行的完整样本, 是研究银河势的重要资料, 同时也能给出球状星团系统的轨道和角动量的分布。从而能较详细地研究金属丰度、近银心距、星团半径与轨道偏心率之间的相关关系。所有这些问题对银河系的形成都有很强的因果关系。

POINTS 的观测能把目前对球状星团内部自行的测定精度由 $100\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 提高几十倍, 从而可以详细地研究星团的自转速度、速度弥散和动力学状态, 以及每个星团的质量分布。此外, 自行弥散与径向速度弥散的比较能给出遥远星团的精确距离。内晕球状星团与外晕球状星团年龄的比较(需要知道它们的精确距离)能估计出银河系形成的时间尺度。对附近疏散星团的观测, 能获得它们的全部的三维图像。比如像昴星团、毕星团、鬼星团和英仙星团等。类似的观测也能确定星协的速度弥散和离解的时间尺度。

4. 广义相对论的检验

模拟计算表明, 用 POINTS 的观测可以将广义相对论效应引起的光线偏折的一阶项检

验精度提高 2—3 个数量级^[8], 目前(γ)的不确定性为 0.002; 但对二阶项 ϵ , 只能给出临界的结果, 除非改变仪器目前的性能, 从而改变它在某一方面的灵敏度。不过仅使用目前的仪器, 也能检测出任何与预计的二阶偏折的显著偏离。

5. 寻找其他的行星系统

除了 POINTS 之外, 在第二节所介绍的几种具有微角秒级的空间和地面上的光学干涉测量仪器, 都可用于寻找太阳系以外的行星系统。如果把太阳放在 10pc 的距离上, 它的几颗大行星对它的位置所产生的影响: 木星为 497 μ as, 土星为 273 μ as, 天王星为 84 μ as, 海王星为 156 μ as。即使把太阳放在 100pc 的距离上(此时它相当于一颗 10mag 星), 几颗大行星对它的影响仍然是可以探测到的。如果以 10 μ as 的观测精度来考虑, 可以探测到远达 300—500pc 处的像太阳-木星这样的系统。像前面介绍的 Keck 这样的地面长基线光干涉仪阵, 于本世纪末之前就能开始对几千颗附近的恒星开始探测。

参 考 文 献

- [1] Hipparcos, ESA BR-24, June 1985.
- [2] Shao, M. et al., preprint (submitted to *Astron. Astrophys.*, 1992).
- [3] Shao, M. et al., *A. J.*, 100 (1990), 1701.
- [4] Reasenberg, R. D. et al., *A. J.*, 96 (1988), 1731.
- [5] Chandley, J. F. and Reasenberg, R. D., in IAU Symp. No. 141, p. 217, (1989).
- [6] Noordam, J. et al., ESA SP-1135, Aug. 1990.
- [7] Pan Xiaopei et al., preprint (submitted to IAU Colloq. No. 135, 1992).
- [8] Reasenberg, R. D., Proc. of The First William Fairbank Meeting on Relativistic Gravitational Experiments in Space, 1990, 1.
- [9] 陈 力, 赵君亮, 天文学进展, 9 (1991), 221.
- [10] 王正明, 徐家岩, 天文学进展, 9 (1991), 228.

(责任编辑 刘金铭)

Astrometric Techniques with Microarcsec Precision and Their Contributions to Astronomy

Xu Jiayan

(Shaanxi Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

Since the success of optical interferometry in last decade, astrometric precision and accuracy have been improved dramatically. The Mark III stellar interferometer could measure star positions with accuracy of several milliarcsec in global astrometry. Future ground-based infrared long-baseline interferometer, such as Keck interferometer array, would have potential of 10 μ as in narrow angle astrometry. A space interferometer being designed and tested in USA will reach accuracy of micro-or submicro-arcsec. Such accurate astrometric data will bring about great contributions to astronomy.