

文章编号: 1000-8349(2010)01-053-19



自行与银河系研究的前沿

金文敬

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 简述了精确测定相对自行的方法, 特别介绍了在用 2~3 个历元的底片和 CCD 观测结果推导恒星自行的过程中如何消除光学视场畸变、星等差和色差的具体办法; 并介绍了用星系把相对自行推算绝对自行的方法。还介绍了用自行资料研究银河系结构和演化的一些前沿课题, 其中包括星团研究、与银河系兼并的矮星系的发现、暗物质的检测、外星行星的探测和银河系中心黑洞的质量估算等。最后评价了自行在研究银河系中的重要性, 论述了我国研制 4m 光学 / 近红外望远镜的重要意义。

关键词: 天体测量学; 绝对自行; 银河系; 暗物质; 外星行星

中图分类号: P129 **文献标识码:** A

1 引 言

按研究方法划分, 天文学通常分为天体物理学、天体力学和天体测量学等分支学科; 按观测手段划分, 有光学、射电、空间天文学等; 按研究对象划分, 又有恒星、银河系、河外星系、宇宙天文学等。这些分类方法相互交叉, 衍生出划分更细的分支学科, 如: 射电天体测量学、银河系天体测量学等^[1]。对某个天体(如恒星、双星、星系等)的研究又包括运动学和内部特性(有效温度、年龄、金属丰度)两个方面; 而对银河系的研究主要集中在结构、运动和金属丰度 3 个方面。银河系和宇宙天体测量学主要从事银河系和宇宙的运动学的研究, 包括银河系厚盘和晕的运动等。按学科划分, 它可归入天体测量学的范畴, 按观测目标分类也可以置于星系工作中。除纯粹的理论研究(如理论天体物理)以外, 天文学各学科的研究都包括理论和观测两部分的工作。如 1846 年海王星的发现就是天体力学理论与天体观测的结果, 水星近

收稿日期: 2009-06-16; **修回日期:** 2009-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10673026, 10878022, 10903022, 10933030); 中国科学院知识创新重要方向项目(KJXC2-yW-T13)

日点的进动是天体物理的爱因斯坦广义相对论理论与观测比较的结果,在天文研究中使用的参考坐标系是由天体测量学中的参考系理论定义,并由观测得到的参考架实现。“自行与银河系天文学”曾是 1996—1997 年为庆祝 Minnesota 大学天文系成立 100 周年而举行一系列讨论会中的一个主题^[2]。而在 van Altena 提出 21 世纪天体测量和天体力学课程的教育大纲中也包含了银河系和宇宙的运动学(有人把这部分内容列入星系天文学)的研究^[3]。本文结合十多年来自行与银河系天文学领域的发展情况,重点介绍这方面的研究进展,以期展现自行工作在银河系运动学研究中的重要作用。第 2 和 3 章将分别介绍自行的精确测定方法、银河系和宇宙的运动学拟解决的一些课题和热点。最后,第 4 章综述自行在银河系研究工作中的重要性,论述了我国研制 4 米光学 / 近红外望远镜的重要意义。

2 自行的精确测定

天体在空间的运动可以用切向和视向速度描述。由于天体测量观测精度的限制,目前还不能直接得到天体测量视向速度,天体的视向速度主要还是从光谱观测得到。其有关情况在本文中不拟涉及。自行是天体的空间运动的切向角速度,在知道天体距离后,就可由此得到天体运动的切向速度。过去用照相天体测量的方法得到自行结果通常需要 20~30a 的时间。而且由于老底片受到当时观测设备极限星等的限制,对银河系运动学研究特别重要的暗的和质量的的天体都未能观测到,无法提供有用的观测资料。近年来随着漂移扫描技术和 CCD 的应用,以 UCAC、NPM 和 SPM 为参考星表,用大望远镜可以观测到极限星等为 22 mag 的天体,通过延长露光时间还可以观测更暗的天体。由此编制的非天体测量星表(如 2MASS 和 DENIS)以及基于施密特望远镜观测的星表 USNO A&B、GSC 和 Cosmos 对天文学有关基础研究、观测设备中的光纤安放、小视场观测的证认星图、HST 导星等方面起了重要作用^[4-6]。为介绍编制包含 10 亿个天体的高精度自行星表的有关情况,本章将着重介绍推算自行的方法、底片模型和绝对自行的确定。

2.1 推算自行的方法

(1) 直接法。用同一观测设备在两个历元拍摄相同颜色的底片,分别处理后得到天体在两个历元时的位置(参考星的赤经和赤纬取自于用绝对观测资料编制的基本星表)。通过比较可得到其位置差,将其除以观测历元之差,即可得到该天体的自行。SPM3、GSC2.3 星表中天体的自行就是这样得到的。对于多历元的观测,可以采用直线拟合的方法,拟合直线的斜率即该天体的自行。

(2) 较差法。在同一观测波段,将参考星的第一历元的观测底片转换至第二历元或标准历元,然后用最小二乘法或者中心重叠法、整体平差法推导目标星的平均位置和自行。一般都采用如下的 2 次方转换公式:

$$\begin{aligned} x_s + \mu_x \Delta_T &= a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2 \\ y_s + \mu_y \Delta_T &= b_1 + b_2 x + b_3 y + b_4 x^2 + b_5 xy + b_6 y^2 \end{aligned} \quad (1)$$

上式中 x_s 和 y_s 为天体在标准底片(一般选择露光时间最长的底片)上的坐标, x 和 y 为各张底片上的量度坐标, Δ_T 为各张底片与标准底片的历元差, μ_x 和 μ_y 为相对自行的

估算值, SPM1 和 SPM2 的归算都运用了式 (1), 并加入色指数项^[7]。用式 (1) 求得底片解后, 应研究残差与色指数、星等的关系。如果这些关系存在, 在式 (1) 的底片常数解算时应当考虑坐标和星等的线性和平方项、彗差项(星等 \times 坐标)、线性颜色和颜色放大项(颜色 \times 坐标), 即色指数项。由于当时研制技术的限制, 用一些较老的折射望远镜(如 Yerkes 1 m、Lick 91 cm、Allegheny 76 cm 望远镜等) 拍摄的底片都应考虑色差、星等、彗差项。另外, 在解算中还必须排除选用大自行的星, 以便得到可靠的底片常数^[8]。特别应该指出, 这种方法所求的相对自行的零点是相对于所有量度场星的自行的平均值而言的^[8]。

2.2 底片模型

天体的光线通过地球大气层和望远镜的一组透镜在接收元件 CCD 或底片上成像。为了能获得天体的理想坐标与在 CCD 或底片上的量度坐标之间的关系, 需要建立底片模型。与底片模型有关的因素有: (1) 望远镜的极轴安放误差、透镜偏心, 特别是施密特望远镜使用改正镜会使拍摄的底片产生歪曲; (2) PDS 量度仪器误差, 包括光学码尺的弯曲和刻度误差(或干涉参考镜的不平整) 和两个量度坐标轴不垂直等。随着计算机技术的发展, 底片模型也有着很大的发展, 通常采用 3 次多项式的形式, 即每个坐标包括 10 项:

$$\begin{aligned}\xi_H &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 \\ \eta_H &= b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5xy + b_6y^2 + b_7x^3 + b_8x^2y + b_9xy^2 + b_{10}y^3\end{aligned}\quad (2)$$

式中 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 分别为将天体的量度坐标换算成理想坐标时的零点、旋转角和比例尺; 公式中的平方项是底片倾斜、畸变中心的位移、PDS 道轨误差和望远镜安放的变化引起的; 3 次方项则是取径向畸变的第一项^[9,10]。它们分别与底片光学中心误差、光学视场角畸变(Optical Field Angle Distortion, 简称 OFAD)、星等差和色差的确定有关, 现分别叙述如下。

2.2.1 底片光学中心的确定

选择不正确的切点作为量度的原点或底片架对望远镜光轴的倾斜都会引起底片光学中心误差, 它影响底片模型中的平方项, 大气折射的改正不准确和极轴安放不当也会引起与底片倾斜相似的平方项。每张底片的 OFAD 中心的确定实际上就是要寻找使公式中平方项最小的位置, 即满足 $\Sigma[(\xi - \xi_H)^2 + (\eta - \eta_H)^2]$ 为最小值^[11,12] 的条件。

2.2.2 OFAD

它产生与天体在视场中位置有关的径向畸变, 此误差与被观测对象离底片中心的距离有关。在望远镜中心观测(如 CCD) 或在小视场 $1^\circ \times 1^\circ$ 时, 底片模型可以仅采用线性项, 而对于 $6^\circ \times 6^\circ$ 底片通常采用包含 3 次项的多项式来拟合。关于施密特底片的处理方法在参考文献[13] 中已详细介绍了底片的分区重叠法、虚格栅法、滤波法, 还有 Bootstrap 法、并置法等, 其中虚格栅法(Mask) 得到广泛的使用。该方法不仅在处理施密特底片时应用, 在一般天体照相机底片的处理中也经常采用。由于在不同的观测计划中, 望远镜的安装和底片量度仪的安装各不相同, 参考星的多少也有不同, 在底片的处理中并不一律采用 3 次多项式来拟合 OFAD, 也有采用更高次项来拟合的。现举例如下: (1) 1995 年 Platais 等在处理 SPM(望远镜口径为 51 cm, 底片大小为 $6.3^\circ \times 6.3^\circ$, 底片在 Yale PDS 测微密度计上量度) 南银极区 17 张(800 平方度) 底片时, 采用了处理施密特底片的 Mask 技术(将底片分成 21×21 小格)。在底片中

心确定后,底片模型采用 $3L+4C+1M$ (L 、 C 和 M 分别表示线性项,3次方项和星等项)的形式^[12]; (2) 1993年Guo等人^[11]在处理1981—1986年用CTIO 4 m望远镜拍摄的8张球状星团NGC288底片时,采用了包含5次项的多项式决定CTIO底片的OFAD; (3) 2008年Lasker等处理9 541张Palomar和UK施密特照相底片(大部分底片大小为 $6^\circ \times 6^\circ$),以ACT和Tycho-2为参考星表(只用暗于8.5 mag的星,因为亮星在施密特底片上露光已饱和),采用Mask技术(将底片分成 40×40 小格),然后用包括二次方项的模型推导底片常数^[6]; (4) 2008年Tang等人处理POSS底片时采用了Mask技术(将底片分成 36×36 小格)和7次多项式的底片模型^[14]。大望远镜上的天体成照相机,如3.5 m ESO NTT的SHARP照相机和1.5 m Palomar的AOC(全称Adaptive Optics Coronagraph),虽然视场不大,但是在推导目标星自行时,也需要用已知位置和自行的恒星或球状星团对照相机作天体测量的校正,推导照相机的天体测量参数仅使用2次多项式。原点位置为零阶项或称为常数项,照相机旋转和比例尺为一次项,以及星场畸变的二次项^[15,16]。

2.2.3 星等误差

它是与星等有关的系统差,由透镜偏心产生彗差和导星误差引起的星像不对称,从而导致星像的几何中心的变化,产生星等误差。如果望远镜的光学和仪器结构是稳定的,则望远镜在不同时刻某一固定位置拍摄底片时,星等差是常数。在望远镜相反的位置拍摄底片时(如拍摄天顶南和天顶北两个天区时),则星等差的符号相反^[12,17]。1995年Platais等人在处理SPM南银极区底片时,在底片边缘的星等差达到 $0.5''$ 。下面介绍星等差的改正方法。

2.2.3.1 SPM通过物端光栅和不同长度的露光时间改正由导星引起的星等差(即衍射光栅技术),这也是SPM自行计划最大的贡献,它是在底片处理前消除星等差的办法^[17]。

2.2.3.2 用外部参考星表确定星等差,现举例如下: (1) 1996年Morrison在GSC底片重叠区发现了星等差,采用AC星表(极限星等为 $14 \sim 14.5$ mag)给出了GSC I星等差特征的残差图,并改正这方面误差^[18]; (2) 1998年Lu等人把46张施密特底片(30张UKST底片和16张Palomar底片)转换至SPM系统,求SPM与USNO-A0.9之间的差值。在用Mask方法和参考星表($B \approx 11$ mag)消除施密特底片的畸变后,在暗星处存在星等差约 $0.3''$ ^[19-20]; (3) 2003年Monet等人用YS4.0(极限星等 ≈ 18 mag)检测和消除USNO-B的星等差。YS4.0是由NPM和SPM底片在USNO Flagstaff台站的PMM量度仪上重新量度的结果编制的。该星表没有自行,但是与USNO-B的观测历元相接近^[21]; (4) 2008年Lasker等人分别用UCAC2和SDSS DR5与GSC2.3的共同星(亮星至中等亮星为 $11.5 \sim 17.0$ mag;中间亮星至暗星为 $14.0 \sim 20.5$ mag)检测和分析星等差。虽然SDSS DR5仅涉及部分天区,但是其对暗星的观测结果比2MASS更为精确。从文献[6]中的图16和17可知:与UCAC2和SDSS星表比较结果为GSC2.3中恒星与非恒星的星等差相似,但是对中间星等范围($14 \sim 17$ mag)两个星表推算的星等差有显著差别,特别是在赤经方向上。虽然星等差在GSC2.3中并没有改正,但是笔者认为有必要用NPM/SPM进一步作比较,然后在2.4版本中消除星等差^[6]。

2.2.3.3 用星团成员星的特征推算星等差的改正。1995年Vera Kozhurina-Platais用星团成员星具有相同的空间运动速度的特征,在处理用Yale-Columbia 66 cm折射望远镜拍摄疏散星团NGC 3680的12张底片时,选择露光时间最长的底片作为标准底片(#Y36),将每张底片上的天体坐标转化至标准底片上的坐标 x_s 和 y_s ,然后以星团中各成员星位置的差值作为

准星等的函数(或者得到一条脊线),用准星等内插得到两张底片上星等差的差值,加入此差值后,底片上的天体位置具有与标准底片相同的星等差,使得再用差值计算的自行中不包括星等差^[22]。

2.2.3.4 在底片模型中加入与星等差有关的线性项。1995年 Platais 等在处理 SPM(南银极区)17张底片时,加入星等的一次项^[12]。1992年 Majewski 在用36张北银极 SA57底片推算绝对自行时,也加入了星等的一次和平方项^[23]。

上面提及的4种消除星等差的方法中,第3种方法受到底片上是否有星团的限制,第2、4种方法只能用参考星表得到星等差。在观测星等暗于星表星等时,只能用外插或者在底片模型中加入星等项,以得到观测恒星的星等差。然而只有第1种方法与所采用的参考星表的星等范围无关。另外,SPM归算中发现星系的星等差可能与恒星不同,如果采用恒星推算的星等差,则得到星系平均亮了 $\Delta m = -0.7 \text{ mag}$ 。在 SPM3 归算中星等差改正仅采用光栅观测恒星的结果^[20]。通常拍摄底片采用长短露光解决长露光时亮星的过饱和问题,并用“中间星”的3次多项式将其化算至长露光或短露光系统。1998年 Girard 在处理 SPM 南银极区底片时发现长短露光的星等差是不同的^[17]。用多次露光推算星等差能得到不同星等范围内的星等差,也可以验证长短露光的星等差是否相同,但是在暗星处,如果没有参考星也只能采取外推的方法。

2.2.4 颜色误差。通常在底片模型中加入天体的色指数($B-V$)的线性项,以改正颜色的影响,如1995年 Vera Kozhurina-Platais 在处理用 Yale-Columbia 66 cm 折射望远镜拍摄的12张底片时,采用平方项底片模型,并加入了色指数项^[22]。在暗星极限星等处(如18~21.5 mag)具有显著的颜色效应,因为对于同样的视星等,蓝星比红星更遥远,在底片解中就会引起百年自行的颜色项。如果用河外天体作为参考架,已知 QSO 是蓝色天体,星系是红色的,两者所得的自行零点改正是不同的,因此需要考虑颜色改正值^[23]。对于底片中心在子午线拍摄天顶距约 10° 以内天区的底片,通常不需要加入较差的色折射改正,如 SPM3 底片对较差色折射的处理^[24]。

2.3 相对自行至绝对自行的归算

利用底片模型推算的自行是相对于参考星而言的相对自行。如选择 FK5 为参考星表,则所推导的自行为相对于 FK5 系统的。把相对自行化算为绝对自行的传统方法是考虑遥远的暗场星的视差动。自从依巴谷星表发表后,已不再采用此方法,在此不详细描述,如果读者对此方法有兴趣,可参见文献[8, 25]。

20世纪70年代 Lick 自行计划提出了用河外星系为基准来推导绝对自行的方法,1987发表的 NPM(参考星表为 AGK3)给出了恒星相对于星系的绝对自行,这是其最大贡献。众所周知12~13 mag 的河外星系的自行只有 $0.0001''/\text{a}$,更暗的河外星系的自行更小。作为测定恒星自行时的定标天体,通常需要观测16 mag 和更暗弱的致密的河外星系,因为这样的河外星系在底片上所成的像与恒星像差不多^[26,27]。具体算法是以参考星表为准,计算得到场星的底片常数,用同样的底片常数计算视场中星系的位置,得到这些河外星系相对于参考星的自行,将这些星系的平均‘假自行’取相反符号,即为将视场中每颗星的相对自行化算至绝对自行的零点改正。1992年 Majewski 在推算 SA57 天区852颗 $B \approx 22 \text{ mag}$ 星的绝对自行时,星系并不参与底片常数的计算,他建议视场中每颗星的绝对自行零点改正采用拟合星系坐标的多项式计算^[23]。另外, Lasker 等人用 SDSS 已证实的46 341 颗类星体的结果发现 GSC2.3.1 南天

自行存在明显的系统差^[6]。

今后,光学参考架的基本天体将由暗的、致密的河外星系和全部类星体组成。已知 Gaia 将观测亮于 20 mag 的 10 亿个天体,其中星系数为 $10^6 \sim 10^7$ 个,类星体为 10^5 个,以此估计类星体和星系的密度分别为每个平方度 2.42 个和 242.41 个。这是选择星系作为河外参考架的天体的下限和上限,这个数值与较多学者的估计基本一致^[11,24,28]。例如 1992 年, Majewski 在测定北银极 SA57 天区(半径约为 $25'$)中天体的绝对自行时,根据星等 $18 \leq F \leq 20.5$ mag, $19 \leq J \leq 21.5$ mag 和光度函数值 $2.45 \leq \phi(r_{-2}) \leq 2.65$ 选择了 139 颗致密河外天体作为绝对天体测量参考架^[23]。2008 年 Andri 给出了包括 128 257 颗类星体的星表^[29],其密度为每个平方度 3 颗。

1998 年 1 月 1 日 IAU 天球参考系采用河外射电参考架,依巴谷星表是河外参考系在光学波段的实现。在低银纬 $|b| \leq 10^\circ$ 或亮星附近无法观测到星系和类星体时,可采用依巴谷星来推算绝对自行零点。另外,即使采用河外星系为基准的参考架,也常需用依巴谷星将其归算至 ICRS 系统,以便相互比较和使用。但是需注意这两种系统之间的系统差,例如 SPM3 选择依巴谷星作为绝对自行零点^[24],它是将 156 个天区中 SPM2 系统的依巴谷星的自行与依巴谷星表中的自行作比较而得到的。每个天区中的星数为 63~147 颗,平均 102 颗,两类自行差值的平均值为: $\mu_\alpha \cos \delta = (0.00 \pm 1.12)$ mas/a, $\mu_\delta = (0.55 \pm 1.18)$ mas/a。1998 年 Platais 等人在处理 SPM 底片时,发现 SPM1 用这两种方法得到的绝对自行存在差别,他分析认为这是由于星系与恒星的星等差的不同造成的。

另外,在量度恒星坐标和编制自行星表后与外部星表,如 Hipparcos (5~11.5 mag)、Tycho-2 (5~12.5 mag)、2MASS 展源和 2MASS 点源星表等进行比较时,涉及到星表之间的交叉认证问题。通常从亮星至暗星对不同星等范围的星表成员依次进行认证。星系的认证可以用 NPM/SPM 肉眼选择的星系星表^[30,31]、NGP 巡天的自动星系认证表 APM^[32,33]和 APS^[34],也可以参考其他学者已作的交叉认证表,如 SPM3(4~17.5 mag)已给出与上述星表以及 SPM2 的相互认证的结果^[35]。在交叉认证时,容许误差的设定也非常重要,例如 SPM1 和 SPM3 与无自行的 2MASS 点源和展源表认证分别设定为 $5''$ 和 $\Delta_m = 2$ mag^[20]以及 $5.5''$ 。GSC II 数据库采用位置容许误差 $1 \sim 4''$ 重复进行。现在主要的工作是暗于 17.5 mag 天体和银道面附近天体密集区的认证,从 GSC2.3 与 SDSS DR5 比较可见,在银纬低于 20° 时,恒星认证的正确性小于 40%,而大于 50° 的,正确率好于 80%;星系/非恒星的认证正确性则相反,在银面处好于 80%,而在银极处较差。

3 银河系与宇宙运动学

恒星天体测量的方法和结果已用于银河系的研究,而且已经把天体测量参数作为宇宙参数的约束。早在 1977 年 Fricke 就利用 FK4 和 FK4 补充星表中的 512 颗远距星的数据和二维的 Oort-Lindblad 模型计算了银河系的自转^[36],1993 年 Miyamoto 等人采用 Ogorodnikov-Milne 三维的银河系自转模型研究了银河系的翘曲^[37,38]。同时人们也从银河系形态的各个部分(银盘、旋臂、核球、银核、银晕)以及表示银河系物理特征各个星族(极端星族 I、中介星族 I、盘族、中介星族 II、晕族)的运动来研究银河系^[39]。近年来,根据自行来研究星团

的成员和内部运动、银河系兼并的矮星系的发现、用斑点干涉和长基线干涉测定双星轨道、银河系盘中暗物质的检测、寻找外星行星 (exoplanet)、测量银河系中心黑洞的质量等已成为与银河系和宇宙运动学有关的热点课题。这些课题讨论了银河系的时空结构, 即银河系的物质分布和运动。本章仅谈及自行与银河系和宇宙运动学的有关问题^[4,5]。

3.1 自行与星团研究

在星团内的恒星是由相同的气体云形成的, 所有的成员星具有大致相同的距离、金属含量和年龄, 所以星团是研究恒星形成和演化的实验室。星团成员星中区别最大的是恒星的质量, 对于给定的年龄和金属丰度, 就可以研究恒星的光度和温度变化与质量的函数关系。由于球状星团内的恒星十分密集, 天体测量卫星不可能全部观测到; 而有的疏散星团所在天区较大也不可能全部观测到。新技术的发展 (如用地面自适应光学望远镜观测小天区内许多星的相对自行和用多目标光纤分光仪测定视向视度和金属丰度) 能够使观测不受照相天体测量在极限星等和观测精度方面的限制^[5], 拓展了疏散星团和球状星团的研究途径。

疏散星团聚集在银盘面附近, 有时也称为银河星团, 它对在研究银盘的结构和演化具有重要的作用。如年轻的疏散星团是研究恒星初始质量函数的理想目标, 其空间分布和运动学与丰度资料结合可以研究银盘的化学演化历史。至今虽然已检测到 1700 个疏散星团^[40], 但其中只有 60% 具有距离和年龄的信息, 50% 有自行资料, 25% 既有自行又有视向速度, 样本中只有 8% 有金属丰度。为了改变此情况, 现在正在进行 WOCS (WIYN Open Cluster Study)^[41]、LOCS (LAMOST Open Cluster Survey)^[42]、SOCS (SEGUE Open Cluster Study)、BOCCE (Bologna Open Clusters Chemical Evolution project)^[43] 等疏散星团计划。WIYN 是美国威斯康星大学、印第安纳大学、耶鲁大学和国家光学天文台的合作计划, 该计划所用仪器有: KPNO 的 WIYN 0.9 m 和 3.5 m 望远镜、KPNO 的 Mayall 4 m 和 CTIO Blanco 4 m 望远镜。后两架望远镜用于深空天体测量, 视场为 $36' \times 36'$, 比例尺为 $0''.26/\text{pixel}$ 。另外, 还可以利用 Mayall 和 Blanco 4 m 望远镜、阿根廷 Cesco 和美国 Lick 天文台 51 cm 望远镜观测的底片资料。其科学目标为获得 14 个不同年龄、不同金属丰度、赤经均匀分布的疏散星团的天体测量、测光和分光资料。LOCS 是中国科学院上海天文台拟用 LAMOST 进行的 4 年观测计划, 以得到 600 个疏散星团 (星等至 16 mag, 银心距扩展至 13~16 kpc) 的视向速度和金属丰度。SOCS 是斯隆的扩充计划 (Sloan Extension for Galactic Underpinnings and Evolution), 将能得到 100 多个疏散星团的视向速度和金属丰度数据。意大利的 BOCCE 计划将观测 30 个星团, 以获得测光和分光资料。

上述的研究计划有的已陆续发表了研究结果, 至 2003 年 WIYN 工作组已经以 “WIYN open cluster study” 为题发表了 30 多篇文章 (如最老疏散星团 NGC188 ($V=21$ mag) 的天体测量和成员星的讨论^[44] 等)。利用疏散星团的天体测量、测光和分光观测, 可以解决许多天体物理的问题: 研究恒星核区的对流超射和恒星的寿命; 通过光变周期的测光监测研究角动量的演化; 作为确定星团年龄的白矮星星序的证据; Fe、CNO 和 Li 的丰度的测定有利于研究恒星内部的混合、扩散等过程, 了解银河系的化学演化和原始丰度; 研究双星族; 得到在密近双星系统中恒星演化以及初始和现在的质量函数。另外, Kharchenko 等人用 ASCC-2.5 星表^[45] 给出了 520 个疏散星团的运动和测光资料, 并用以研究银河系的参数: 旋转常数、速度椭圆参数、银河系轨道要素、盘的标高和太阳离银道面的距离等。最新的估计结果显示: 在银

河系中约有 63 000 个疏散星团 [46]。

3.2 发现与银河系兼并的矮星系

众所周知, 伴星系的吸积在晕和整个银河系的形成中起了重要的作用。这可以由人马矮椭球星系 (Sagittarius dwarf spheroidal galaxy, 简称 Sgr dSph) 的发现和潮汐瓦解伴星系形成的细长的恒星流给予证明。在 M31 和更遥远星系中晕的潮汐流的出现是一个普遍的现象。另外, 对星系晕的形成是源于一个大气体云的快速坍缩还是伴星系的缓慢合并, 人们进行了长时间的讨论。现已在星系晕中发现了小质量星系与银河系并合后留下的星系的残骸, 在相当大的伴星系与银河系并合时, 形成了厚盘星族并吹喷出一个前薄盘星族。通常认为外晕是伴星系的吸积作用形成的, 而内晕是原星系的耗散坍缩形成的。利用 λ 冷暗物质宇宙模型预测在离太阳 1 kpc 以内有几百个被兼并的矮星系, Johnston 等人预测兼并矮星系的遗迹的速度弥散度为 5 km/s 或者更小, 如果潮汐流存在, 则用 WYIN ODI(全称 One-Degree Imager) 的自行精度 (约为 $270 \mu\text{as/a}$) 估计, 在 2 kpc 内 100 平方度天区中可以发现 20~30 个潮汐流 [5]。人们用理论计算推测在银河系引力作用下矮椭球星系瓦解而产生恒星碎片流, 如 1993 年 Kuhn 推测在 Ursa Minor、Draco、Carina 和 Sextans 矮椭球星系的潮汐半径外应当有低面密度的恒星碎片流 [47]。

1994 年 Ibata 首先在人马矮椭球星系 ($l = 5.6^\circ, b = -14.0^\circ$) 检测到这个星系因银河系的潮汐作用而瓦解产生的潮汐流 [48,49]。它位于球状星团 M54 (NGC 6715) 位置, 大小约 $22^\circ \times 8^\circ$, 包括了四个球状星团 M54、Ter7、Ter8 和 Arp 4 的成员。其成员星的年龄约为 10 Ga, 轨道周期为 0.76 Ga, 形状是扁长的, 轴的比例为 3:1:1, 星团中心的银心距约为 16 ± 2 kpc(离太阳 25 kpc)。人马矮椭球星系的银心切向轨道运动速度为 $(2.1 \pm 0.7) \text{ mas/a}$, 即 $(250 \geq 90) \text{ km/s}$, 它平行于主轴, 向着银道面。用 SPM3 得到该星系的绝对自行 $\mu_l \cos b = (-2.35 \pm 0.20) \text{ mas/a}$, $\mu_b = (2.07 \pm 0.20) \text{ mas/a}$, 两者是相符的 [50]。它的主轴 ≤ 9 kpc, 其指向沿着坐标线 $l = 5^\circ$ 垂直于银道面, 每经过 2~4 次轨道周期, 将失去其 1/2 的质量, 直至完全瓦解。现在的人马矮椭球星系是致密的暗物质。同年, Majewski 等人用北银极 SA57 自行资料在平均距离 4.5 kpc 处发现有一个晕族移动星团, 此样本的空间分布和金属分布的不对称和簇聚, 依此说明了银河系晕中大尺度星流的存在, 并向着银道面运动 [51]。1995 年 Guo 在南银极发现一个顺行的晕星流, 但是没有发现逆行的向着银道面的星流 [52,53]。1997 年 Schweitze 等人测量 Ursa Minor 矮椭球星系的绝对自行时, 发现了 Ursa Minor 星流 [54]。同年, Smith 等人在 Carina 和 Draco 长短轴方向用 CCD 测光证明了低面密度的恒星碎片流的存在 [47]。

现在观测到的星流有 3 种情况: (1) 由于潮汐作用, 人马矮星系正在瓦解或受到剧烈的应力; (2) 一些球状星团具有“潮汐尾”: 这些星正处在星团潮汐半径之外; (3) 恒星的非束缚的云包围了一些矮椭球星系。观测证明在晕中保留了这些恒星的残骸。这些过程在整个星系的演化历史上都曾发生过, 虽然有些分析提出了最大的可能性, 但是恒星的残骸是形成现在恒星晕的重要部分。寻找星流有两种方法: 形态方法和运动学方法。形态方法即根据伴星系有一个尾巴或者在伴星系轨道前后有超密集星的特点来寻找。运动学方法即测量恒星的运动, 在伴星系的星流中恒星的空间运动 (自行与视向速度) 应与伴星系具有相同的轨道运动 [55]。银河系的矮椭球星系出现在 2 个大圆上, 或者说构成 2 条星流: 麦哲伦星流 (包括 Draco、Ursa Minor 和 Carina dSph 星系) 和第二条星流 (包括 Fornax、Leo I、Leo II 和 Sculptor dSph 星

系)。LMC 和 SMC 几乎位于与 Ursa Minor 和 Draco 相反的方向上, 带有气体和尘埃的 LMC 在一个极轨道的麦哲伦星流的前面, 沿着一个近南银极的弧段, 跨过银河系, 向着 Ursa Minor 和 Draco 运动。Lynden-Bell 定义了一个麦哲伦极轨道, 它与麦哲伦云、Ursa Minor、Draco 和麦哲伦星流的位置以及 LMC 的运动是相符合的。尽管 Sculptor 的轴向着 dSph Fornax, 然而其自行超出了麦哲伦星流, 但是 Sculptor 的位置接近麦哲伦星流的轨道, 所以仍可能是麦哲伦星流的成员^[54]。

人马星流的研究可以测量 LSR (Local Standard of Rest) 的速度和太阳处银河系的旋转速率。有人曾用 Hipparcos 星表中盘造父变星、OB 星、疏散星团的自行, HST 观测得到的球状星团中核球族星相对于星系的自行, 以及用 Sgr A* 的自行得到了太阳处银河系的旋转速率, 这些结果存在大于 20% 的差异 (207~240 km/s)^[56]。如果考虑到盘的非轴对称性, 此速度可能低至 (184±8) km/s, 而由银河系亮度估计, 如果速度超过 220 km/s, 则将远离 Tully-Fisher 关系。所以 Majewski 提出测量太阳相对于人马星流残骸平面 (近似于一个极轨道, 与银道面的交线为银道坐标系的 X 轴) 的运动, 这样不仅避免了观测被尘埃阻碍和星体密集的银心, 而且 R_0 与参考点位于银河系势中心的假说无关。在用此方法推导太阳运动精度为 1 km/s 时, 要求人马座曳臂部分的自行精度为 0.01 mas/a (SIM PlaneQuest 有望能达到此精度)。另外, 用潮汐流可以研究银河系引力势的形状和强度 (即银河系的质量分布)。假如能测量残骸星的距离、角位置、视向速度和自行, 则就能够在假定的引力势中给出它们的轨道。只有在正确的引力势中, 星流的路径与原伴星系的时间、位置和速度才会相符^[56,57]。

上面讨论了在银河系晕中气体和恒星的星流 (如人马座星流) 的存在, 实际上, 在银河系外也发现了其他类似的情况, 如 2000 年 9 月 3—9 日 Ibata 等人用西班牙 Roque de los Muchachos 天文台 2.5 m Isaac Newton 望远镜的大视场照相机观测以最近的大星系 M31 (距离约为 780 kpc) 为中心的 58 个连续的天区 (离中心 4° , 每次拍摄 0.3 平方度), 其极限星等 $V = 24.5$ mag。他们在仙女座 M31 的晕中发现了一个富金属的红巨星支星流, 这个星流可能是靠近 M31 的矮星系 M32 和 NGC 205 在潮汐作用下失去的一些恒星^[58]。

3.3 银河系暗物质的检测

银河系是被暗物质晕包围着, 它的质量为银河系可见部分质量的 10 倍。晕的成分是未知的, 晕族大质量致密天体 (Massive Compact Halo Objects, 简称 MACHO) 是其候选者, 这些冷暗物质 (Cool Dark Matter 简称 CDM) 是低光度、朦胧的恒星 (褐矮星或 M 型矮星) 或者是燃烧殆尽的恒星遗迹 (白矮星、中子星、黑洞)。晕的特征对宇宙学和星系形成理论有着重要的意义。由于可见物质的引力场不能解释观测到银盘的转动特性, 从而证实了球状晕中暗物质的存在^[59]。现在观测认为它可能是年老的、非常冷的白矮星 (即与星系年龄相仿的古老星族的遗迹) 渐变而成的, 所以寻找白矮星可以直接检测暗晕物质。在 1999—2000 年间仅证实了四例特别冷的, 温度在 4 000 K 以下的白矮星。因为这类星太暗, 在以前的巡天中不可能观测到。除此以外, 也可以用微引力透镜效应来检测暗晕物质。

Oppenheimer 等人用超 COSMOS 巡天 (SuperCOSMOS Sky Survey, 简称 SSS) 在 R59F 和 B_J 波段 (对应于 0.59 和 0.45 μm) 的数字化底片中寻找自行 μ 在 0.33''/a 至 10.00''/a 之间、星等暗至 19.8 mag 的天体。采用的底片靠近南银极, 具有 3 个观测历元, 总共包括 4 165 平方度天区, 占整个天区的 10%。为了确认白矮星, 在亚光度的白矮星与主序星的比较中采

用了归化自行 (reduced proper motion) 技术。在 69 颗候选星中, 16 颗为 M 型矮星或 M 型亚矮星、2 颗热 He 白矮星、13 颗 H α 特征的冷白矮星和 38 颗新的冷白矮星, 这 38 颗冷白矮星占局域暗物质的 2%。自 20 世纪 90 年代初 MACHO 和 EROS (Expérience pour la Recherche d' Objets Sombres) 两个研究组计划在大小麦哲伦星云区寻找组成银河系晕的低亮度星以来, 分别得到这些致密天体占局域暗物质的 (8~50)% 和 35%, 这是最低的估计值^[60]。

1963 年 Kumar 以及 Hayshi 和 Nakno 理论上预测褐矮星是恒星形成中的低质量副产品。在理论发表后 25 年, 1988 年 Becklin & Zuckerman 在 200 颗白矮星附近寻找小质量的伴星, 发现了离白矮星 GD 165 120AU 处的褐矮星 GD 165B。它是最冷的褐矮星, 温度为 2 100 K, 质量在 $0.06 M_{\odot} \sim 0.08 M_{\odot}$ 之间。这个天体介于恒星和行星之间, 是 1 个奇异的天体^[61]。1995 年 Nakajima 在 100 颗年龄约为 1 Ga 的近距星中发现了与 M1 矮星 Gl 229 相距 44 AU 处的褐矮星 Gl 229B。继后, 1997—2000 年间在 2MASS、DENIS、SDSS 巡天中也分别发现了 124 和 13 颗比 M9.5 矮星晚且光谱类似 GD 165B 和 Gl 229B 的天体。这些星不同于 M 型矮星, 与 GD 165B 光谱类似的称为 L 型星 (T_{eff} 大约在 2 200~1 300 K 之间), 它是质量非常小的恒星和褐矮星的混合。而与 Gl 229B 光谱类似的称为 T 型星 (T_{eff} 大约在 750~1 200 K 之间), 全部由褐矮星组成^[62]。1993 年末开始用 Palomar 1.5 m 望远镜的 AOC 进行 8 pc 以内寻找褐矮星伴星的巡天观测^[16]。这是在近距星研究中第一次使用自适应技术, 发现了质量非常小的伴星: M 型 (晚于 M6) 矮星 Gl 105C (Gl 105 是一个 3 星系统, 距离为 (8.19 ± 0.67) pc), 距主星 3.27", 位置角 287°, 绝对星等 $M_I = (13.1 \pm 0.2)$ mag, 从经验的质量—光度的关系估计其质量为 $(0.084 \pm 0.008) M_{\odot}$ ^[63]。1998 年 UCLA 近红外小组与 IPAC 合作开始用 Keck II 近红外分光仪进行 BDSS (Brown Dwarf Spectroscopic Survey) 巡天, 其目的为: (1) 得到小质量恒星和褐矮星样本的 NIR (近红外) 中等分辨率光谱, 并与理论的光谱能量分布比较; (2) 得到一组高分辨率光谱, 以便把个别光谱特征与大气模型比较; (3) 检测未分辨双星伴星引起的多普勒位移^[64,65]。2003 年 Schmidt 等人用 VLT+NACO 观测 TWA 5B (第一颗绕主序前星运动的褐矮星) 的光谱和自行资料推导了其轨道运动。它是年轻的晚 M 型褐矮星, 也是金牛 T 型的 TW Hydrae 星协的成员^[66]。2006 年智利 Paranal 天文台和 Las Campanas 天文台分别用 VLT+NACO (自适应光学系统) 和 PANIC+Baade 以及共同自行方法对近距的 28 和 38 颗白矮星 (星等分别为 $J_{\text{limit}}=23.5 \sim 24$ mag 和 $21 \text{ mag} < J < 22$ mag) 寻找亚恒星伴星^[67]。至 2007 年 10 月 5 日在红外和 Sloan 巡天中已发现 606 颗 L/T 型星, 50% 在银道面外, 它是 50 pc 内 L 和亮 T 型矮星的 25%。由于 Gaia 的极限星等为 20 mag, 只能观测到其中的 100 颗。虽然 Gaia 计划仅观测 400 颗 L/T 型星 (不包括双星系统中的 L/T 型星), 但是 SIRTf (Space Infrared Telescope Facility) 和 JWST (James Webb Space Telescope) 有望能检测到比 T 型矮星更冷 ($T_{\text{eff}} = 130 \sim 800$ K, 质量为 $25 \sim 1 M_J$) 的褐矮星, 这些天体介于 T 型星和冷的、小质量和更具有行星特征的自由漂浮的褐矮星之间, 而其在银河系中的数量是未知的。现在全球有 7 个计划测定 L/T 型星的距离, 今后 PanSTARRS、LSST、SKYMAPPER 也将测定 L/T 型星的视差。为了观测比 Gaia 极限星等更暗的 L/T 型星, 用地面具有 IR 照相机的 4 m 量级的望远镜是合适的^[68,69]。

3.4 检测外星行星

为了更好地了解太阳系的形成和演化, 应当研究外星行星系统形成及其演化的理论。与

上一节相似首先要寻找白矮星和褐矮星的伴星。检测外星行星的方法有: 力学效应、微引力透镜、测光信号, 将来可能还有恒星的吸积、自吸积星子等方法用来检测外星行星。用力学效应检测外星行星的方法通常有 3 种: 定时法、视向速度法和天体测量方法^[70]。尽管现在大部分外星行星是从视向速度变化中发现的, 但是天体测量方法与视向速度方法相比较的优点是: (1) 随着行星绕主星的周期的增加, 天体测量的信号也增大, 而视向速度方法则相反, 因此该方法能检测与太阳系相似的具有木星质量的行星系统; (2) 天体测量信号与系统的倾角无关, 可以直接测量行星与恒星的质量比。用视向速度方法检测到的行星都靠近主星, 只有 25% 的行星轨道超过 1.5 AU, 没有一颗像木星那样远的。

1995 年瑞士天文学家 Michel Mayor 和 Didier Queloz 从视向速度的变化中发现了绕太阳型恒星 51 Pegasi 运动的第一颗外星行星, 其质量为木星质量的 1/2, 周期 4.23 d。1995 年 9 月—1998 年, 瑞士日内瓦天文台 Delfosse 等人提出了用上普罗旺斯天文台 1.93 m 望远镜, 终端为 ELODIE 装有光纤的分光仪观测 125 颗近距 M 型矮星的 3 年观测计划。1998 年 6 月后这个计划中的有些南天星也用瑞士在 La Silla 的 1.20 m 望远镜 CORALIE 分光仪进行观测。这个观测计划有 2 个目的: 建立 M 型矮星系统的多样性统计和确定主星序底部的质光关系。由此发现了近距 M4 型矮星 Gl 876 (HIP 113020) 有一颗木星质量的行星 Gl 876b, 它是一颗离太阳最近的外星行星, 距离为 4.7 pc, 第 40 个最近的恒星系统, 第 53 颗最近的恒星。Gl 876 的质量为 $0.3M_{\odot}$ (不确定性可能为 30%), 是行星质量的 150 倍, 半径约为 $0.3R_{\odot}$, 比太阳冷和亮度低。其伴星的周期为 60.97 d, 偏心率 $e=0.336$, 最小的轨道半长轴 $a \sin(i) = 0.2$ AU。假如 Gl 876 的质量为 $0.3M_{\odot}$, 则伴星质量为 $2M_J / \sin i$ (M_J 为木星的质量)^[71]。2008 年初用 ESO3.6m 的 HARPS 分光仪观测 CoRoT-Exo-7b 的视向速度变化。2008 年 3 月夏威夷 3.6 m CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope) 和 ESO 的 8.2 m VLT 都对此星进行了观测。CoRoT (Convection, Rotation, and planetary Transits) 小组从 VLT 的红外分光仪得出该星是 1 个三合星系统, 包括 1 颗 K0 型矮星和 1 对交食红矮星, 由视向速度变化得到周期 0.85 d, 另一个行星的周期为 3.6 d。2009 年 1 月再次用 HARPS 分光仪观测, 以确定是密近食双星, 还是外星行星。CoRoT-Exo-7b 是位于麒麟座的 1 颗 12 mag K0 型矮星的行星, 它距主星 0.017 AU (约为主星半径的 4 倍, 是水星离太阳距离的 4%), 半径为地球半径的 1.7 倍, 质量为 2~11 个地球质量, 以 217 km/s 的轨道速度绕 TYC 4799-1733-1 旋转 (主星为太阳质量的 93%, 太阳直径的 87%, 太阳亮度的 40%, 温度为 5300°C , 比太阳冷 500°C)。以前 TrES-4 和 HAT-P-11b 分别是最大和最小的外星行星, 现在 CoRoT-Exo-7b 才是一颗最小的外星行星^[72]。

现在许多天文机构正在开展外星行星的检测。例如美国 Allegheny 天文台用多通道分光光度计 (Multichannel Astrometric Photometer with Spectrograph, MAPS) 安装在 76 cm 的 Thaw 折射望远镜上, 同时使用两种检测技术测定天体的位置和视向速度 (精度为 3 m/s), 使所得的相对位置精度比照相方法更高, 通常一个夜晚观测精度为 0.4 mas。1995 年 MAP 发表了 267 颗星的星表, 其中包括星的位置、自行、光谱型和色指数, 并观测了 20 颗近距星, 以便检测行星系统所引起该星运动中的非线性变化。Gatewood 等人从 1999 年 4 月开始对北冕座 ρ 进行了 1.5 a 的观测。他用 MAP 观测该星的 11 个轨道周期资料和依巴谷卫星观测的 28 个轨道资料得到北冕座 ρ 的周期分别为 39 d 和 39.5 d (在依巴谷星表中列出为 80 d, 而用视向速

度方法得到为 39.6 d)，两者非常符合。两种方法相结合得到轨道半长轴为 $(1.66 \pm 0.35) \text{ mas}$ ，这表明该伴星的运动是可以检测的。由此得到伴星的质量为 $(0.14 \pm 0.05) M_{\odot}$ ，它比视向速度法测定的质量大两个量级（视向速度法测定的质量为 $0.001 M_{\odot}$ ）。太小的质量不能引起这样的运动，如果同样的轨道，伴星的质量为 $0.001 M_{\odot}$ ，其引起的运动只有 0.013 mas 的信号，这样微小的运动只有 Gaia 才能检测到，因此在外行星的检测中用多种方法证认是必需的。他认为这颗近似于 M 型矮星的质量的伴星不可能是一颗行星，因此北冕座 ρ 是一颗分光双星。现在已把 MAPS(改进的 MAP) 安装在夏威夷 Keck 望远镜上，它可以同时用视向速度（精度为 3 m/s ）和天体测量方法检测外行星系统。天体测量精度为每晚 0.1 mas ，比现有其他天体测量仪器的测量精度高 1 个量级。同时使用两种方法检测外行星的缺点是增加了搜索的空间和相互证认的工作，但是改进了两方面工作：在两个颜色 ($400 \sim 650 \text{ nm}$, $650 \sim 1\,000 \text{ nm}$) 波段进行观测可以消除在小视场 (4 平方角分) 内的较差大气折射，并且提高观测精度^[73]。另外，还有美国 JPL 的 STEPS 计划 (Stellar Planet Survey)。该计划用 5m 望远镜和天体测量方法观测 30 颗近距 M 型矮星周围的具有木星质量的大行星。除此以外，也可以用光干涉和斑点干涉仪进行这方面工作^[74,75]，至 2007 年 10 月已检测到 250 多颗外行星，而且还在不断增加。2007 年 IAU 第 249 次讨论会专门谈及了外行星的检测、形成和动力学问题。2009 年 7 月在上海又召开了“褐矮星和外行星的多样性探测新技术”讨论会。

2006 年 12 月发射了 CoRoT 卫星，在观测中已发现了 7 颗外行星，后美国 NASA 的 Kepler 卫星已于 2009 年 3 月发射，也用于检测外行星。在未来的空间天体测量卫星 Gaia 和与空间干涉测量计划 SIM 中，都有检测具有木星和地球质量大小的外行星系统的任务，现在美国空间望远镜研究所和意大利都灵天文台等单位联合成立了行星系统工作组专门考虑用天体测量方法检测外行星^[76]。

3.5 测量黑洞和恒星的质量

银河系中心的暗物质究竟是一个由若干 $10 \sim 20 M_{\odot}$ 的恒星黑洞组成的核坍缩星团，还是一个大质量的黑洞，或者两者兼而有之，这是长期未解决的问题^[77]。由于银心处恒星密集，再加上气体和暗物质的掩蔽，光学观测无法进行。对银心的地面观测只限于射电和近红外波段，本节只介绍在近红外波段观测银心附近天体的运动情况。从以下的观测结果证实了 Sgr A*(IR) 星团的存在，这也说明了银河系中心的暗物质是一个大质量的黑洞。

现在有德国 Max-Planck 地外物理研究所和美国 UCLA 物理和天文系的两个小组采用不同仪器开展此项工作，1991 年前者采用 ESO 的 NTT 3.5 m 望远镜的 SHARP 照相机开始 K 波段 ($2.2 \mu\text{m}$) 的斑点成像观测计划，1992 年首次得到银河系中心区的斑点成像结果。2002 年开始在 ESO 的 VLT 8.2 m 上采用 NACO 系统的自适应光学装置进行观测。1995 年，后者用夏威夷 Keck 10 m 望远镜的 NIRC 照相机在 K 波段处对银河系中央星团进行成像观测和恒星自行的测定。

研究进程大致分为 3 个阶段：(1) 初期主要工作是银河系中心的成像；(2) 1997 年前后在银河系中心 $0.3''$ (0.01 pc) 内发现了快速运动 ($v > 1000 \text{ km/s}$) 的天体，使此研究能深入进行。并首先用自行证明银心 Sgr A* 附近有一个大质量的黑洞并估算了其质量^[15,77,78]；(3) 2000 年开始了中心区恒星的轨道运动的测定。随着观测历元间隔的增大，至 2008 年用恒星的自行和视向速度可以同时估计其轨道运动、黑洞的质量和太阳至银心的距离 R_0 ^[79-81]。特别应指

出在推算银河系中心区恒星的自行时, 采用 2.1 节中的方法 (2), 而没有采用红外参考星表。选择 Sgr A* 红外星团 (SgrA* 周围 0.1 pc 的范围, 约 $6'' \times 6''$) 的一些星作为参考架, 在归算中考虑了用天体测量校正的照相机参数, 如原点、旋转、比例尺、畸变, 并利用同时能在红外和射电波段成像的 SiO 源将结果归算至绝对自行^[15,82]。

1996 年 Eckart 和 Genzel 发表了 1992—1996 年期间 5 个历元的观测结果: Sgr A* 星团 39 颗星和中央部分 11 颗星的自行, 相对位置精度为 10~20 mas, 自行的精度为 50 km/s。用视向速度和自行计算得到在 Sgr A* 周围 0.015 pc 内有质量为 $(2.45 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$ 的暗物质, 其密度为 $10^{12} M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$, 因此是一个大质量的黑洞^[15]。1998 年 Ghez 等人^[78] 利用 1995—1997 年间 3 个历元给出的 90 颗星的自行, 得到相似的结果, 质量和密度分别为 $(2.6 \pm 0.2) \times 10^6 M_{\odot}$ 和 $10^{12} M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$ 。

2000 年以后这两个小组开始发表 Sgr A* 红外星团中恒星轨道运动的研究结果。如果引力势是球对称的, 则投影在天空平面上, 加速度矢量指向质量中心方向, 多个加速度矢量的相交点, 即暗物质所在的位置。因此, 用加速度矢量研究中央质量的分布比速度矢量更精确。2000 年 Ghez 等人利用 1997—1999 年的观测资料得出在 0.004~0.013 pc ($0.1'' \sim 0.32''$) 范围内 3 颗星 (S0-1¹⁾, S0-2, S0-4) 的加速度测量结果, 精度为 2~5 mas/a²。由这 3 颗星的加速度矢量推导得出的质量约为 $3 \times 10^6 M_{\odot}$ 。由于观测弧段较短, 拟合结果很不确定: S0-1 的周期为 35~1 200 a, $e = 0 \sim 0.9$ 和投影角 $\theta = 51^{\circ} \sim 56^{\circ}$; 而 S0-2 则分别为 15~550 a, $e = 0.5 \sim 0.9$, $\theta = 25^{\circ} \sim 37^{\circ}$ 。如果用视向速度, 则结果更精确^[79]。特别应指出, 2008 年 Ghez 等人用 Keck 望远镜 10 多年的成像 (1995—2007 年) 和光谱观测 (2000—2007 年) 资料, 其中 1995—2005 年用 NGAO (Natural Guide Star Adaptive Optics) 系统的斑点干涉仪 NIRC (Near Infrared Camera), 2004 年以后采用激光导星自适应光学 LGAO (Laser Guide-Star Adaptive Optics) 的 NIRC2 (视场 $10.2'' \times 10.2''$) 得到 S0-2 (SgrA*(IR) 星团中轨道周期最短和最亮的星) 在 27 个历元时的天体测量和测光结果, 以及在 11 个历元的视向速度结果, 用这些资料可推算中央黑洞的 7 个参数: 质量 (M)、距离 (R_0)、位置 (X_0 和 Y_0) 和运动 (V_x 、 V_y 、 V_z); 及每颗星的附加自由参数: 周期 (P)、偏心率 (e)、过近星点时间 (T_0)、倾角 (i)、升交点位置角 (Ω)、至近星点的角度 (ω)。由 13 个参数模型得到中央黑洞的距离为 (8.0 ± 0.6) kpc, 质量为 $(4.1 \pm 0.6) \times 10^6 M_{\odot}$, 黑洞的视向速度 RV 为 0 (不确定性为 30 km/s)。如果解算时给予约束 $V_z = 0$, 则得到中央黑洞的距离为 (8.4 ± 0.4) kpc, 质量为 $(4.5 \pm 0.4) \times 10^6 M_{\odot}$ ^[80]。Max-Planck 小组正在对 Sgr A* 红外星团约 100 颗星作测光和光谱观测, Gillessen 等人用 1992—2007 年间 15 颗星的轨道 (其中, S2 即 S0-2, 在 2002 年通过近星点, 至 2007 年已观测到了一个轨道周期) 得到中央黑洞的质量为 $4 \times 10^6 M_{\odot}$, 位置与 Sgr A* 的射电位置和一个虚的近红外对应体相符^[81]。

现在 NTT 自适应光学系统的天体测量精度约为 350 μas , 能否检测相对论后开普勒效应是众所关注的。广义相对论预测: (1) 轨道周期为 15 a 的 S2 星的近星点具有 0.2° 进动; (2) 当 Schwarzschild 度规引起顺行的进动时, 从天体物理观点来看可能存在反作用效应, 即有一个

1) : 星团星的命名为以 SgrA* 为中心, 半径为 1'', 2'', 3'' 作圆, 在 1'' 以内的记为 S0, 而其附属的以与 SgrA* 的距离从小至大命名, 如 S0-1, S0-2...S1-1, S1-2...S3-1, ...S4-1 等。在 SgrA*(IR) 星团中央部分 ($0.4'' \times 0.4''$) 也可用 S1, S2...S11...S33 等命名, 其中 S0-1 即 S1, S0-2 即 S2, S0-4 即 S8。

至今未能见到的、扩展的分量引起逆行的进动。这两个效应与 S 星离中心质量的距离有关, 因此观测 S 系统可以测量这两个效应和扩展的分量^[81]。

4 结束语

在 GSC 2.3、SPM3 星表的编制, 北银极附近 SA57 天区至 $B \approx 22$ mag 天体绝对自行的推导, 以及“十五”国家自然科学基金会天体测量重点课题“依巴谷参考系的扩充及在银河系研究上的应用”的子课题 LAMSOT 标准天区的建立的过程中遇到的问题和取得的经验的基础上, 本文提出在编制暗至 20 mag 10 亿颗天体的绝对自行星表中应注意和考虑下列 5 个问题:

(1) 第一和第二历元采用相同的望远镜拍摄, 用较差法推算自行更好, 如 SPM2。如果两个历元的观测采用不同的望远镜, 则由于各架望远镜的特征不同, 必须分别解算两个历元的底片常数, 因此推算自行时, 只能采用直接法。但是也有例外, 如 SPM3, 虽然第一和第二期观测历元所用的望远镜相同, 但是采用直接法推算自行, 并换算至 SPM2 系统。今后, 如果用 POSS I、POSS II 底片和新的观测推算自行时, 采用直接法更为合适。

(2) 现在底片和 CCD 观测资料的处理都采用 Tycho-2 作为参考星表。虽然 Tycho-2 中星的密度为 60 颗/平方度左右, 但是亮星在施密特底片上会饱和, 所以 GSC2.3 只用暗于 8.5 mag 的 Tycho-2 星作为参考, 这样就降低了参考星的密度。因为底片解与参考星的多少有关, 是采用全部 Tycho-2 星和包括高阶项的底片模型, 还是用 Tycho-2 暗星和 2 阶或 3 阶底片模型值得进一步研究。

(3) 1998 年 Platais 在 SPM 归算中发现星系的星等差与恒星不同, 由经验得到所有星系都亮了 $\Delta m = -0.7$ mag, 因此, 在以星系为基准的绝对自行归算中, 星系和恒星应采用不同的星等差。1998 年 Girard 在处理 SPM 南银极区底片时发现长短露光的星等差是不同的。多次露光推算星等差能得到不同星等范围内的星等差, 也可以检证长短露光的星等差是否相同, 但是并不能求出暗星的星等差, 在暗星等处, 如果没有参考星也只能外推或者在底片模型中加入星等差项。

(4) 尽管现在许多底片常数解不包括颜色项, 但是在星等跨度范围大, 暗星极限星等达到 20 mag 时, 因为对于同样的视星等, 蓝星比红星更遥远, 所以在底片解中引起了长期(百年自行)的颜色项。另外, 已知 QSO 是蓝色天体, 星系是红色的, 两者所得的自行零点改正是不同的, 因此也需要考虑颜色改正值。

(5) 河外参考架由类星体和星系构成, 由于在照相底片上亮星系受到形状的限制, 暗星系必须严格地证认, 所以星系的选择是构成河外参考架的首要工作。以河外星系为基准的参考架不能用于低银纬和亮星附近, 在这些天区应当采用依巴谷星归算。在用 Tycho2 作为参考星表后计算得到的星系位置应考虑与恒星不同系统差, 如颜色差、星等差等。对于星系坐标的偶然误差可以把它们自行的平均作为每张底片相对自行的零点改正, 或者采用移动平均消除偶然误差, 如分块法、无限重叠圆法(块的大小与圆的半径决定于河外天体的数量)^[83]。另外, 恒星相对自行的零点改正也可以采用拟合该天区全部星系自行与坐标关系的多项式推算^[23]。

银河系的时空结构是由物质分布和运动所决定的。银河系的运动与天体测量参数(特别是

自行)有着密切的关系。目前与银河系和宇宙研究的运动学有关的 5 个热点课题如下所述:

(1) 星团是研究恒星形成和演化的实验室。研究疏散星团和球状星团的动力学,最合适的方法是用地面自适应光学望远镜观测小天区内许多星的相对自行。过去测量自行需要 20~30 a,而且老的底片受到亮极限星等的限制,不能观测到感兴趣的暗的和质量的星。现在仅用 2 a 时间就可以得到亮度为 22 mag 天体的自行。疏散星团聚集在银道面附近,因此在决定银盘的结构和演化中起了重要的作用。LAMOST 为我国提供了开展疏散星团的有利条件,有望花 4 年时间得到 600 个疏散星团的视向速度和金属丰度。

(2) 1994 年 Ibata 在人马矮椭球星系检测到因银河系潮汐而瓦解而产生的潮汐流,现在许多天文学家致力于寻找类似于人马矮椭球星系的潮汐流和一些球状星团具有的“潮汐尾”。由各种方法测定的 R_0 和 LSR 的速度有很大差异,如 R_0 为 8~8.5 kpc, LSR 的速度 207~240 km/s。2006 年 Majewski 提出用 SIM PlanetQuest 测量太阳相对于人马座星流残骸平面(近似于一个极轨道,与银道面交线为银道坐标系的 X 轴)的运动,测定 R_0 和 LSR 的速度。这样不仅克服了观测尘埃的阻碍和星体密集的困难,而且 R_0 与参考点位于银河系势中心的假说无关。用此方法推导太阳运动的精度为 1 km/s 时,要求人马座曳臂部分的自行精度为 0.01 mas/a。

(3) 银河系暗物质包括一些发光非常微弱的恒星和不可见的物质,前者是褐矮星或 M 型矮星或者是燃烧尽的恒星遗迹(白矮星、中子星、黑洞)。采用了归化自行的方法检测这些小质量、低亮度的天体,也用视向速度和天体测量的共同自行方法发现白矮星或年轻褐矮星的伴星—冷褐矮星^[16,60]。后者是不可见的物质,只能用微引力透镜效应检测。特别需要指出在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初发现的光谱型在 M 型矮星之后的 L 和 T 型矮星, 2MASS、Sloan、DENIS 等巡天对发现这类星作了很大贡献。因为这类星较暗, Gaia 的极限星等为 20 mag,只能观测 400 颗,新的发现取决于地面口径 4 m 量级的望远镜,现在有 7 个测定 L 和 T 型星视差的计划。另外, SIRTf 和 JWST 有望能检测比 T 矮星更冷的褐矮星,这些天体更具有行星的特征,而其在银河系中的数量是未知的。

(4) 与地外生命相联系的外行星的检测是天文学的热点课题,除用地面望远镜的视向速度和天体测量方法外,已发射的 CoRoT 卫星发现 7 颗外行星,美国 NASA 的 Kepler 探测器也已发射。在未来的空间天体测量卫星 Gaia 和空间干涉测量计划 SIM 中,都有检测具有木星和地球质量大小的外行星系统的任务。我国 LOMOST 也将在这方面做出贡献。

(5) 在近红外波段对银心 15 a 的高精度天体测量观测证实了银心附近有一个大质量的黑洞,并确定了 S 系统 15 颗星的轨道。展望未来工作有 3 项: (a) 随着观测精度的提高,相对于 Sgr A* 位置和速度的误差主要是坐标系的误差,如果用平均速度为 3.8 mas/a 的 2700 颗星(亮星位置和自行精度分别达到约 100 μ as 和 20 μ as/a) 定义一个坐标系,则坐标系速度的校正的精度为 80 μ as/a,这个参考系比用 SiO 脉泽源的射电坐标构成的参考坐标系更好; (b) 通过长期监测 Sgr A*(IR) 星团的 100 颗星,能给出更多 S 系统星的轨道参数、以及黑洞的质量、所在位置和 R_0 ,另外,用大望远镜和长基线组成的干涉仪进行观测,可以得到更有意义的结果。如 ESO VLTI 的 GRAVITY,有可能发现在 100 mas (0.004 pc) 内周期为 1a 的 S 星(约 5 颗 17~19 mag 的星); (c) 验证广义相对论效应:包括近星点的顺行进动,以及一个可能的扩展分量引起近星点的逆行进动。另外,银心提供了唯一观测许多强重力效应(如引力红移、多普勒位移增强和多像现象等)的实验室^[85]。

最后, 本文指出只有天体测量和天体物理参数相结合才能全面和完全地了解银河系的结构和演化; 在天文学前沿课题中除了空间观测外, 近红外波段的观测是必不可少的, 我国应加快研制 4 m 光学 / 近红外望远镜, 并开展这方面的前沿课题的研究。

致谢 在本文撰写过程中与紫金山天文台李东明研究员和上海天文台宋国玄研究员进行了有益的讨论, 作者表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 张钰哲, 戴文赛, 李 珩, 王绶琯. 中国大百科全书 (天文学). 北京: 中国大百科全书出版社, 1980: 1
- [2] Humphreys R M ed. Proper Motion and Galactic Astronomy, ASP Conf. Ser. 127, 1997, San Francisco, CA: ASP)
- [3] van Altena W. In: Jin W J, Platais I, Perryman M A C eds. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 514
- [4] van Altena W, Stavinschi M. RevMexA A, 2008, 34: 22
- [5] van Altena W. RevMexAA, 2008, 34: 1
- [6] Lasker B M, Lattanzi M G, McLean B J, et al. AJ, 2008, 136: 735
- [7] Girard T M, Grundy W M, López C E, et al. AJ, 1989, 98: 227
- [8] Cudworth K M. AJ, 1985, 90(1): 65
- [9] Chiu L T G. AJ, 1977, 82: 842
- [10] Eichhorn H. 恒星方位天文学, 任江平等译. 北京: 测绘出版社, 1981: 46
- [11] Guo X, Girard T M, van Altena, et al. AJ, 1993, 105: 2182
- [12] Platais I, Girard T M, van Altena W F, et al. A&A 1995, 304: 141
- [13] 金文敬, 唐正宏, 王叔和. 云南天文台台刊, 2003, 3: 22-35
- [14] Tang Z H, Qi Z X, Yu Y, et al. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 334
- [15] Eckart A, Genzel R. MNRAS, 1997, 284: 576
- [16] Oppenheimer B R, Golimowski D A, Kukarni S R, et al. AJ, 2001, 121: 2189
- [17] Girard T M, Platais I, Kozhurina-Platais V, et al. AJ, 1998, 115: 855
- [18] Morrison J E, Röser S, Lasker B M, et al. AJ, 1996, 111: 1405
- [19] Lu C-L, Platais I, Girard T M, et al. New Horizons from Multi-Wavelength Sky Survey, IAU Symposium 179, Dordrecht: Kluwer, 1998: 384
- [20] Platais I, Girard T M, Kozhurina-Platais V, et al. AJ, 1998, 116: 2556
- [21] Monet D G, Levine S E, Canzian B, et al. AJ, 1998, 125: 984-993
- [22] Kozhurina-Platais V, Girard T M, Platais I, et al. AJ, 1995, 109(2): 672
- [23] Majewski S R. ApJSS, 1992, 78: 87
- [24] Girard T M, Dinescu D I, van Altena W, et al. AJ, 2004, 127: 3060
- [25] Brown A. ApJ, 1951, 113: 344
- [26] 戴文赛. 恒星天文, 北京: 科学出版社, 1965: 171
- [27] Majewski S R. ARA&A, 1993, 31: 575
- [28] Chiu Liang-Tai George. AJSS, 1980, 44: 31
- [29] Andrei A H, Assafin M, Barache C, et al. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 260
- [30] Klemola A R, Hanson R B, Jones B F. Lick Northern Proper Motion: NPM1 Ref. Galaxies (VizieR On-line Data Catalog: I/200), 1993
- [31] Platais I, et al. SPM Catalog 2.0, VizieR On-line Data Catalog: I/277

- [32] Irwin M, Mc Mahon R. APM Northern Sky Catalogue, in IAU Commission on Instruments, 1992, 2: 31
- [33] Loveday J. MNRAS, 1996, 278: 1025
- [34] Cornuelle C S, Aldering G, Humphreys R M, et al. Proper Motion and Galactic Astronomy, ASP Conf. Ser. 127, CA: ASP, 1997: 55
- [35] <http://www.astro.yale.edu/astrom>, 2009
- [36] Fricke W. Veroff. Astron. Rechen-Institut Heidelberg, 1977, 28: 1-15
- [37] Miyamoto M, Sama M. AJ, 1993, 105(2): 691-701
- [38] Miyamoto M, Sama M. AJ, 1993, 105(6): 2138-2147
- [39] Girard T M, Korchagin V I, Casetti-Dinescu D I, et al. AJ, 2006, 132: 1768
- [40] Dias W S, Alessi B S, Moitinho A, et al. A&A, 2002, 389: 871
- [41] Mathieu R D. Stellar Clusters and Association: Convection, Rotation and Dynamos, ASP Conf. Ser., San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2000, 198: 517
- [42] Chen L, Hou J L, Zhao J L, et al. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 433
- [43] Bragaglia A, Tosi M. AJ, 2006, 131: 1544
- [44] Platais I, Kozhurina-Platais V, Mathieu R D, et al. AJ, 2003, 126: 2922
- [45] Kharchenko N V. Kinemat. Phys. Celest. Bodies, 2001, 17: 409
- [46] Kharchenko N V, Piskunov A E, Roser A E, et al. A&A, 2005, 438: 1163
- [47] Smith H A, Kuhn J R, Hawley S L. Proceedings of ASP Conference Series, 1997, 127: 163
- [48] Ibata R A, Gilmore G, Irwin M J. Nature, 1994, 370: 194
- [49] Ibata R A, Wyse R F G, Gilmore G, et al. AJ, 1997, 113(2): 634
- [50] Dinescu D I, Girard T M, van Altena W F et al. ApJ, 2005, 618: L25
- [51] Majewski S R, Munn J A, Hawley S L. ApJ, 1994, 427: L37
- [52] Guo X, Girard T M, van Altena W F, et al. Galactic and Solar System Astrometry, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994: 150
- [53] Majewski S R, Munn J A, Hawley S L. ApJ, 1996, 459(2): L73-L76
- [54] Schweitzer A E, Cudworth K M, Majewski S R. Proceedings Of ASP Conference Series, 1997, 127: 103
- [55] Hamlin M. Proceedings Of ASP Conference Series, 1997, 127: 137
- [56] Majewski S R. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 450
- [57] Majewski S R, Law D W, Polak A A, et al. ApJ, 2006, 637: L25-28
- [58] Ibata R A, Irwin M, Lewis G, et al. Nature, 2001, 412: 49
- [59] Murdin P. Encyclopedia of Astronomy and astrophysics, London: Institute of Physics, 2001: 583
- [60] Oppenheimer B R, Hambly N C, Digby A P, et al. Science, 2001, 292: 698
- [61] Becklin E E, Zuckerman B. Nature, 1988, 336: 656
- [62] Kirkpatrick I D. ARAA 2005, 43: 195
- [63] Golimowski D A, Nakajima T, Kulkarni S R, et al. ApJ, 1995, 444: L101-104
- [64] <http://www.astro.ucla.edu>, 2009
- [65] Mclean I S, McGovern M R, Burgasser A J, et al. ApJ, 2003, 596:561
- [66] Schmidt T, Neuhauser R, Mugrauer M. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 126
- [67] Radiszcz M, Mendez R. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 116
- [68] Smart R L, Bucciarelli B, Lattanzi M G, et al. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 429
- [69] Burrows A, Sudarsky D, Lunine J. ApJ, 2003, 596: 587
- [70] Perryman M C. Rep. Prog. Phys., 2000, 63: 1209
- [71] Delfosse X, Forveille T, Mayor M, et al. A&A, 1998, 338: L67-70
- [72] Fressin F, Aigrain S, Charbonneau D, et al. Spitzer proposal, 2009: 534
- [73] Gatewood G, Han I, Black D. ApJ, 2001, 548: L61-L63

- [74] Borucki W, Koch D, Basri G, et al. Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics, proceedings of the IAUS 249, 2008: 17
- [75] Pravdo S H, Shaklan S B. Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Plants, ASP Conference Series , 2003, 294: 107-110
- [76] <http://www.esa.int/SPECIALS/CoRoT>, 2009
- [77] Eckart A, Genael R. Nature, 1996, 383(3): 415
- [78] Ghez A M, Klein B L, Morris M, et al. ApJ,1998, 509: 678
- [79] Ghez A M, Morris M, Becklin E E, et al. Nature, 2000, 407: 349
- [80] Ghez A M, Salim S, Weinberg N N, et al. ApJ, 2008, 689: 1044
- [81] Gillessen S, Genzel R, Eisenhauer F, et al. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 466
- [82] Menten K M, Reid M J, Eckart A, et al. ApJ, 1997, 475: L111-L114
- [83] Taff L G, Bucciarelli B, Lattanzi M G. ApJ, 1990, 361: 667
- [84] Reid M, et al. ApJ, 2007, 659: 378
- [85] Eisenhauer F, Perrin G, Straubmeier C, et al. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 100

Proper Motions and the Frontier of Studies on the Galaxy

JIN Wen-jing

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: The methods of determinations of precise proper motions by using the observations with photographic plates and CCD at the 2–3 epochs are described. The detailed technique to eliminate Optical Field Angle Distortion (OFAD), magnitude equation, colour equation is given. In order to obtain the absolute proper motions referred to faint galaxies the procedure for determining the zero correction to relative proper motions is presented.

For compiling a catalogue referred to the galaxies as the reference frame we should pay attention to the following 5 points:(1) The direct method will be adopted for determining the absolute proper motions referred to faint galaxies with observational data of POSS I, POSS II and new surveys. (2) The saturation always happens on photographic plates and the measuring error is relatively large for bright stars. It should be considered whether 2-3 order terms or high order terms in the plate model, corresponding to the reference stars down to 8.5 mag or all stars, are adopted. (3) The magnitude equations for stars and galaxies is different due to brightening of galaxies about -0.7 mag. The magnitude equation is not obtained for fainter stars if there is no reference stars. It should be derived by extrapolation or adding a term of magnitude equation in plate model. (4) The colour correction should be considered because QSO are blue celestial bodies and galaxies are red one. (5) The selection of galaxies is the first important work in constitution of extragalactic reference frame for determining the absolute proper motions. The systematic errors such as magnitude and colour equation etc. should be also considered and the

moving average methods such as infinitely Overlapping circles or subplate will be adopted to eliminate accidental errors.

There has been close relation between kinematics of the Galaxy and cosmology and the astrometric parameters, specially, proper motions. The five front subjects in this field are described as follows: (1) Studying stellar cluster. In the past it was necessary to wait 20—30 years for determining proper motions but this study down to magnitude 22 or to even fainter magnitudes can be carried out only in 2 years time span with new technology such as adaptive optics, high quality CCD cameras, multi-object spectrograph. Open clusters (OCs) like a probe to study the structure and evolution of the Galactic disk. We expect that the radial velocities and metal abundances for 600 OCs will be obtained in the next 4 years by using LAMOST. (2) Discovering dwarf galaxies and tidal streams. Now many astronomers devote to search tidal stream as Sgr tidal stream and “tidal tail” in globular clusters. In addition, Majewski proposed to measure the solar motion with Sgr debris plane by SIM PlanetQuest for determining the R_0 and rate of LSR in 2006. This method would not only overcome traditional difficulties with working in the highly dust-obscured and crowded Galactic center, but be independent of R_0 and any assumptions that the reference lies in the center of the Mike Way potential. (3) Searching for dark matter in the Galactic disk. 38 new cool white dwarfs were detected with reduced proper motion by Oppenheimer in 1994. The unseen matter can be indirectly detected by micro-gravitational lensing such as MACHO and EROS projects. L and T dwarf, companion star of white dwarf and M dwarf, were discovered in 1988 and 1995. A greatly contributing action in discoveries of L and T dwarfs has been made by using 2MASS, Sloan, DENIS survey etc.. Gaia can only observe these stars of about 400 due to the limiting magnitude of Gaia. New discoveries will be made by 4-meter-class telescopes on ground. In addition, we expect that SIRTIP and JWST can detect the cooler stars than T dwarf. (4) Detecting the exoplanets. Besides discovering exoplanets by ground-based observations with radial velocity and astrometric method the satellite of CoRoT and Kepler was launched in 2006 and 2009 respectively. LAMOST will make its contribution in this field soon. (5) Measuring the masses of black holes and stars. Through high precision astrometric observations for 15 years a supermassive black hole at the Galactic Center is confirmed and the stellar orbits of 15 stars in the system of S-stars are well determined. Many relativistic events such as prograde precession, retrograde precession to be induced by a so far unseen, extended mass component, gravitational redshift, Doppler boosting and multiple images etc. will be observed in the near future.

Finally, it is emphasized that the Galactic structure and evolution can be fully understood only by combining astrometric and astrophysical parameters. And we should attach importance to fabrication of a 4 meter optical/infrared telescope in our country for studying these subjects as mentioned above.

Key words: Astrometry; absolute proper motion; Galaxy; dark matter; exoplanet