

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.01.04

依巴谷后的天体测量卫星项目—— 空间光干涉卫星

金文敬

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 简述了依巴谷后提出的天体测量卫星项目, 如 FAME、DIVA、JASMINE、SIM Lite、Gaia、OBSS、JMAPS 等。描述了空间光干涉从 1980 年至今的发展过程, 特别给出了用天体测量方法研究天体物理课题之 SIM Lite 工程的近况: 科学目标、仪器的结构、技术上的重大突破点和观测方式等。重点介绍了 SIM Lite 参考架的构建, 包括栅格星和类星体的选择, 以及 SIM Lite 光学参考架与射电参考架 ICRF-2 之间的联系和联系的精度。比较了 SIM 与 Gaia 观测方式的不同点, 以及它们在天体物理研究和参考架的建立上互补之处。最后, 回顾了中国科学院“八五”重点项目“光学天文中高空间分辨率应用和技术研究”和当前开展有关光干涉工作的一些情况, 以及今后开展此课题的若干建议。

关键词: 光干涉; 迈克尔孙干涉仪; 参考架; SIM Lite

中图分类号: P129

文献标识码: A

1 引 言

1989 年 8 月第一颗天体测量卫星 (依巴谷卫星) 的成功发射, 开辟了空间天体测量的新纪元。依巴谷卫星的主要成果——依巴谷星表已于 1997 年 6 月发表。1990 年 4 月哈勃空间望远镜发射, 其所携带的天体测量仪器——精细导星传感器也投入了工作。继后, 各国空间局先后提出了 FAME^[1-4]、DIVA^[5]、SIM Lite^[6-11]、Gaia^[12-13]、JASMINE^[14-15]、OBSS^[16-18]、JMAPS^[19-20] 等空间天体测量项目。这些天体测量卫星按波段可分为光学和红外; 按观测方法可分为巡天和指向式; 按结构可分为折反射和干涉式, 即使同是干涉式的, 也有采用斐佐模式和迈克尔孙模式的区别。卫星上所携带仪器有的只有 CCD 照相机, 也有的还安放了分光仪、测光仪和成像仪。上述这些天体测量卫星项目中, 由

收稿日期: 2012-04-25; 修回日期: 2012-06-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (10878022, 10903022, 10903030); 中国科学院知识创新重要方向项目 (KJ CX2-yW-T13)

于经费缺少, 有的已取消, 有的 (如 SIM Lite) 已通过设计和预研究, 但是还没有足够经费投入仪器研制, 只能处在等待状态, 现在仅有 Gaia 和 JASMINE 还在进行。表 1 按项目提出的先后列出它们的简况。

表 1 依巴谷后的天体测量卫星项目

名称 ¹⁾	立项年份	预期发射年份	波段	口径/cm 基线 (B)/cm	焦距 /m	星等 /mag	精度/ μas	现状
FAME	1995	2000	光学	10×20(2 个) $B = 50$		15	20~800	取消
DIVA	1996	2002	光学	面积 5 cm ² $B = 10$	有效 焦距 6	5~14.5	300~11 000	取消
SIM	1997	2017	光学	50(2 个) $B = 600$		-1.5~20	4(WA)、 1(NA) ³⁾	2010 年 取消
FAME	1999	2004	光学	60×58	15	5~15	5~9 mag: < 50; 9~15 mag: <500	2002 年 取消
Gaia	2000	2013	光学	145×50 (3 个)		6~20	<12 mag: 7; 15 mag: 25; 20 mag: 300	Phase C
JASMINE	2003	2016	红外	75	22.5(z) 12.3(k)	14(z) 11(k)	10	Phase C
OBSS A ²⁾	2004	2014	光学	150×50 (3 个)	45	7~20	<10	
B								
C			近红外	100×100	10	11(M)	<1000	
JMAPS	2006	2013	紫外、 光学、 红外	19	3.8	15	5~9 mag: <50; 9~15 mag: <500	

注: 1) 全名依次为 FAME: Fizeau Astrometric Mapping Explorer; DIVA: Deutsche Interferometer für Vielkanalphotometrie und Astrometrie; SIM: Space Interferometer Mission; FAME: Full-sky Astrometric Mapping Explorer; JASMINE: Japanese Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration; OBSS: Origins Billion Star Survey; JMAPS: Joint Millarcsecond Pathfinder Survey.

2) OBSS A、B、C 分别为 3 个望远镜, 将给出银河系 10^9 颗以上恒星的位置、视差、自行、光度、双星和测光变化。

3) WA, NA 分别表示大视场 (wide angle) 和小视场 (narrow angle)。

在上述建议的天体测量卫星项目中, 尽管早期 FAME、DIVA 和初始的 Gaia(曾用名 Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 的结构都考虑干涉式的, 但是难度大, 最后只有 SIM Lite 采用干涉式结构。Gaia 已在参考文献 [12] 详细描述。尽管 SIM 项目已在

2010 年取消,但是其采用的技术特殊,而且在这些项目中观测精度最高。我国也曾在 20 世纪 90 年代做过初步的试验,许多学者给予了关注,所以本文将重点介绍 SIM Lite 项目。第 2 章介绍 SIM Lite 项目的现状;第 3 章给出该项目的科学目的;第 4 章描述 SIM Lite 仪器的结构和观测方式;第 5 章描述 SIM Lite 参考架,包括栅格星和类星体的选择,以及与射电参考系的联系;第 6 章给出 SIM 和 Gaia 的不同之处,也谈及它们在天体物理研究和参考架上的互补性;第 7 章回顾了我国的光干涉工作和今后开展该工作的若干建议。

2 SIM Lite 项目的现状

虽然近年来地面的高角分辨率技术有了重大突破,但是地面上高角分辨率的干涉测量仍然受到地球大气的限制。在空间用长基线光学干涉技术进行观测的优点是:(1)除了电磁波段以外,它可以在全光学-红外波段(远紫外(110 nm)至远红外(300 μm))进行观测。(2)观测的极限星等和大视场的天体测量精度将提高。(3)用地面干涉仪进行成像观测时,只能在几个角秒的视场内呈现高角分辨率的像(即受到等晕斑点大小的影响);没有大气后,可能在整个视场中给出高分辨率的像。(4)一架致冷的空间仪器的热背景很低,因此,提高了观测灵敏度。今后,空间大口径、低温的干涉仪可以探测近距恒星周围类地球行星的热辐射^[22]。因此,早在 20 世纪 80 年代初许多单位就提出了空间干涉仪计划(称为 Astrometric Interferometer Mission,简称 AIM),如 JPL 的 OSI(Orbiting Stellar Interferometer)、史密松天体物理台和加州大学天体物理与空间科学中心等单位提出的 POINTS(Precision Optical Interferometer in Space)、ESA 的 OASIS(Optical Aperture Synthesis In Space)和法国地球动力学中心的 TRIO 计划等,而且 1984 年 10 月在法国 Cargese 召开了“Kilometric Optical Arrays in Space”专题讨论会。SIM 是 1990 和 2000 年“美国天文和天体物理十年计划”的建议项目,1997 年 10 月进入 Phase A^①,并作为 NASA Origins 计划的一部分。2003 年 7 月开始进入初步设计阶段 Phase B,在这个阶段需要对系统的要求、系统的设计和对该项目的异议进行讨论,并提出实验项目。2006 年 SIM 改名为 SIM PlanetQuest,属于 NASA 外星行星探测计划(Exoplanet Exploration Program,即以前的导航计划 Navigator program)。为了节约经费,2008 年把干涉基线由 10 m 改为 6 m,因此称为 SIM Lite 计划(即 SIM PlanetQuest light,全称为 SIM Lite Astrometric Observatory)。虽然仪器小型化,但是它不仅能探测外星行星,而且达到 2000 年 NASA 选择 SIM 项目时提出的所有科学目标;然而与 SIM PlanetQuest 相比,探测行星的目标要减少。SIM Lite 的飞行系统将和 Spitzer 和 Kepler 卫星一样,采用 EELV(Evolved Expendable Launch Vehicle)进入地球拖着卫星绕太阳的轨道。2000 年 8 月 NASA 提出,2009 年 9 月发射改为用航天飞机携带,它包括一个飞船和一个光学望远镜,重 2930 kg,在天空运行 5 a。飞船在轨道上受到太阳照射,SIM 在地球轨道附近将以 0.1 AU/a 的速率漂离地球,5.4 a 后达到最大的通讯距离 0.6 AU。2009 年 4

^①Phase A: 概念和技术发展; Phase B: 初步设计和技术完备; Phase C: 最后设计和制造; Phase D: 系统安装,装配、测试和发射; Phase E: 发射和科学运行; Phase F: 关闭。

月该项目已进入 Phase B 后期, 至 2010 年共用了 13 年 (1997–2010) 进行设计和研究。

整个项目由项目团队和科学团队承担, 负责人为 JPL 的 Marr, 参加的主要工作人员有 70 多人, 其中包括了 10 个主要研究者和 5 个飞船发射专家。项目团队中包括了干涉技术专家 Shao 和 Unwin 等人; 科学团队中有外星行星专家 Marcy, 天体测量专家 Johnston 等。由于经费短缺, 2007 年 2 月许多在 SIM 项目上工作的工程师已转至其他领域的项目上, 2008 年 NASA 在 SIM 项目上的经费投入为零, 所以整个工程减慢。

该项目由美国 NASA 负责, 并与 Northrop Gruman 公司签约。工业的合作者: 加州 Lockheed Martin Missiles and Space 和 TRW 公司的 Space and Electronics Group。SIM Lite 工程由以下各个机构参与:

- (1) JPL(Jet Propulsion Laboratory), 项目负责、仪器设计和飞船的运行;
- (2) NGAS(Northrop Grumman Aerospace System), 提供飞船和为精密安放仪器所需的支撑结构;
- (3) KSC (NASA Kennedy Space Center), 提供飞船发射装置;
- (4) NExSci (NASA Exoplanet Science Institute), 负责安排 5 年内 SIM 科学团队选择的和通过一般观测计划申请的两类观测, 以达到最佳的科学目的;
- (5) DSN(Deep Space Network), 对飞船进行跟踪和采集数据。

原计划 SIM 于 2005 年放在 EEFLV 上发射, 该项目至少 5 次延迟了发射时间, 如 2000 年 8 月 NASA 提出延迟发射时间为 2009 年, 2004–2006 年间承担 SIM 设计和制造的 Northrop Gruman 公司网页上又给出发射时间为 2011 年, 2007 年 4 月 NASA 预测发射不早于 2015 年或者 2016 年。由于该项目没有通过 2011–2020 年美国天文和天体物理的十年规划, 所以 NASA 已经在 2010 年取消了 SIM 和 TPF (Terrestrial Planet Finder) 计划。然而, SIM 的设计概念是先进的, 达到了现有项目中最高的天体测量精度, 也只有 SIM Lite 才能检测位于近距类太阳恒星周围宜居区内的一个地球质量的行星。有些关键技术和方法能用于其他项目, 如计量技术曾用于 ESA (全称 European Space Agency)M 级项目 NEAT(Nearby Earth Astrometric Telescope) 的设计^[23]。

3 SIM Lite 的科学目的

SIM Lite 是用天体测量方法研究天体物理问题的项目。SIM Lite 运行在地球拖曳的绕日轨道上, 除了在太阳附近半径 49° 范围内不能观测以外, 任何时间都可以观测 83% 天空内的天体。观测星等 M_V 为 $1.5 \sim 20$ mag, 天体测量的精度为: 在直径 15° 大视场中测定亮于 14 mag 恒星位置的精度为 $4 \mu\text{as}$, 观测 100 h 后, 19 和 20 mag 星的位置精度分别为 8 和 $15 \mu\text{as}$; 在直径为 2° 小视场观测中, 较差观测的精度为 $1.4 \mu\text{as}$; 在 $0.3''$ 像场中图像的分辨率为 10 mas。观测精度与测量时间的长短有明显的关系, 观测时间越长, 精度越高, 如星等为 19 mag 的恒星, 观测时间为 102.0 和 59.8 h, 精度分别为 8 和 $10 \mu\text{as}$, 详细结果列于参考文献 [24] 中的表 2。与其相关的天文量, 如距离、质量和速度的精度分别为: (1) 视

差。对于距离在 10 pc (100 000 μas) 的单颗星, SIM Lite 测量视差的精度约为 0.04%; 对在 10 kpc (100 μas) 的球状星团, 测量精度约为 4%; 可以测量至 750 kpc (1.4 μas) 处 M31 的距离。(2) 质量。通过外星行星的轨道运动引起主星位置的扰动可以估算行星的质量, 以 10 pc 处一颗绕 G 型恒星轨道运动行星引起恒星的位置扰动为例, 如果地球、木星、“热木星”大小的行星分别在 1 AU、5 AU 和 0.05 AU 处, SIM 测量行星对恒星位置的影响分别为 0.3 μas 、500 μas 、5 μas 。(3) 恒星运动。在 10 pc 处测定速度精度为 1 m/s, 对应于自行精度 21 $\mu\text{as/a}$; 在 1 Mpc 处速度精度为 10 km/s, 对应于自行精度为 2.1 $\mu\text{as/a}$ ^[9]。SIM 有 4 个科学目标和 1 个与 HST 类似的一般观测计划, 即全球天文学家提出观测项目以后, 由专家评议决定是否执行。各类目标观测时间的分配详见参考文献 [24] 中的表 1, 以下详述 4 个科学目标。

3.1 探测宜居的星球

现在检测外星行星有 4 种方法: 视向速度 (radial velocity, 简称 RV)、凌日、直接成像技术和天体测量。以往发现的外星行星都是采用了多普勒技术测定 RV 的摆动, 如已发表的 778 颗近距外星行星表^[25], 表中给出了巨大气体行星的精确轨道和行星质量。RV 技术的测定精度为 1 m/s, 即 RV 半幅度约为 0.1 m/s, 但是多普勒技术不可能测定恒星表面 0.1 m/s 的喷流, 也不能检测在 1 AU 处质量 $1 M_{\oplus}$ 绕主星运行的行星, 所以现在发现的外星行星都是气体型的或有冰的巨星, 木星半径大小的行星, 其最小的质量大于海王星的质量。只有 SIM 才能检测位于近距类太阳恒星周围的宜居区内一个地球质量的行星。2006 年 Catanzarite 等人用较差测量精度为 0.85 μas 的 200 个延迟值进行模拟计算, 结果表明可以检测最近距离几个目标的质量灵敏度约为 $0.2 M_{\oplus}$ ^[26]。

SIM 采用天体测量方法检测行星, 即测量行星轨道运动引起主星位置的摆动。它用 3 种观测方式探测行星: 深度巡天、广度巡天和年轻行星巡天。(1) 深度巡天。假如 SIM Lite 有 46% 的时间用于行星深度探测, 则在 5 年内将对 65 颗近距的主序星 (星等亮于 6 mag, 离太阳在 10 pc 以内的 F、G、K 和 M 型恒星) 用观测精度 $1\mu\text{as}$ 的 NA 观测方法探测在这些类太阳恒星周围的宜居区内是否存在类似地球的行星。(2) 广度巡天。SIM 将用 5% 的时间对 1050 颗星等亮于 10.5 mag, 距太阳 200 pc 的各类恒星 (包括不能采用 RV 技术的 O、B、A、早型 F 型恒星) 进行精度为 4 μas 的观测, 给出热的、冷的、岩石、巨冰的和巨大气体行星, 以及多行星系统的大样本, 以便了解行星系统的性质和演化。(3) 年轻行星巡天。SIM 将用 2% 的时间寻找星等亮于 11 mag, 离太阳 100 pc 以内, 年龄 2 Ma~100 Ma 的少数年轻星 (小于 100 颗) 周围的行星, 观测精度为 4 μas , 以便了解气体巨行星 (如木星大小) 的形成和行星系统早期的力学演化^[27]。总之, SIM Lite 将探测各种类型的行星, 如近距类太阳恒星附近地球质量的行星、年轻星周围的行星和多行星系统^[10,28,29]。

3.2 暗物质和星系会聚

宇宙中可观测到的各种星际物质、恒星、星团、星云、类星体、星系等仅占总能量的 4%, 其他是不可见的暗物质和暗能量, 其中暗物质则占了 23%, 还有 73% 是一种导致宇宙加速膨胀的暗能量。暗物质的极小部分是在黑洞、中子星、衰老的白矮星、褐矮星等的晕族大质量致

密天体中,而大部分是一种不知特征的非重子物质的暗物质,其空间分布也不太清楚,只能从它对可见天体的引力效应推出其存在。现在已经从旋涡星系的自转速度曲线,由弱引力透镜效应引起背景星系图像的畸变,以及星系和星系团中热气体的温度分布证明了暗物质的存在。这些物质兼并成星系,并与最大结构(如星系团)观测的特征相符。银河系及其伴星系统是冷暗物质(cold dark matter,简称CDM)模型的实验室,SIM将观测潮汐流中的恒星、超高速星、矮星系、银河系伴星系和球状星团的自行,以探测星系尺度的暗物质和星系的会聚。以下仅对测量银河系周围潮汐流中恒星和超高速星的运动,以及矮星系的研究做详细描述。

(1) 测量银河系周围潮汐流中恒星的运动,以便研究外晕和星系会聚。在银心距 >30 kpc处恒星分布是不均匀的,它是由于潮汐力使得伴星系瓦解才形成的。如果我们能测量残骸恒星的距离、角位置、视向速度和自行,则在假定的银河系引力势下可知它们的整个轨道。只有正确的引力势,星流中残骸恒星的路径才能和伴星系的路径在时间、位置和速度上相符合,因此银河系潮汐流可以探测银河系的引力势及其质量分布。近年来已发现了内晕的许多潮尾目标用于晕引力势的测定,如与Sgr一起的M型巨星^[30]、球状星团Pal 5和NGC5466^[31],以及SDSS(Sloan Digital Sky Survey)发现了2个冷的“孤立”星流^[32],还有“反银心的”或“麒麟座”星流^[33]。在银河系外围,矮椭球星系(dwarf spheroidal galaxy, dSph) Ursa、Minor、Carina、Sculptor、Leo I都已被认为存在残骸恒星^[34],并已证明在外晕中也存在来自Sgr矮椭球星系的残骸恒星^[35]。SIM以km/s精度测量这些目标中20 mag星的横向运动,它将探测银河系的质量分布,包括3维形状、密度轮廓,以及在单个暗物质晕中次结构的大小。

(2) 超高速星(hypervelocity stars,简称HVS)给出了一个测量银河系至大距离范围内暗物质质量分布形状的方法。HVS的星等为16~20 mag,距离20~100 kpc处速度500 km/s的HVS相应于自行1000~5000 $\mu\text{as/a}$ 。这些具有极大速度的星,只可能解释是由靠近银心的一个特大质量黑洞处抛出的。每一颗HVS对银河系引力势、太阳圆周速度和太阳至银心距离是一个独立的约束。2006年Brown等人曾发现了5颗银心速度550~720 km/s的HVS^[36],今后地面巡天和Gaia将发现更多的HVS。SIM可测定位置和自行精度至 μas 量级,同时测定速度矢量的指向好于1%,所以能更好地对HVS定轨。

(3) 在一些矮星系中,特别在dSph中,如近距(60~90 kpc)的Draco、Ursa Minor、Sextans和Bootes,暗物质是其中最主要的成分。由于dSph的小尺度(1 kpc)和大的质光比($100 M_{\odot}/L_{\odot}$),所以它能研究最小尺度上暗物质晕的结构,dSph内部结构成为用SIM测定暗物质物理特征的一个新途径。CDM粒子具有可以忽略的速度弥散度和很大的中心相空间密度,在可观测尺度上形成 $\rho = 1/r$ (r 为离中心的距离)的密度轮廓(称为cusps);相反,温暗物质(warm dark matter,简称WDM)具有较小的中心相空间密度,所以形成 $\rho = \text{恒值}$ 的密度轮廓(称为core)。假如后者是暗物质物理的一个结果,则这些恒值的密度轮廓占据了位力半径的很大部分,与其他星系中的恒值密度轮廓相比,在dSph中的恒值密度轮廓更容易观测。如果用dSph中心的速度弥散度,则在dSph恒值密度轮廓的早期约束中排除了WDM,如标准大质量中微子。现在对Fornax dSph的研究给予中微子暗物质特征很强的约束^[37],如果单独采用视向速度,即使有几千颗视向速度样本,无论暗物质密度轮廓采

用 $\rho = 1/r$ 或者恒值密度模型拟合,则在描述星系内部恒星运动的球对称 Jean 方程解中,由于暗物质密度轮廓的斜率与速度各向异性,参数有着很强的简并性,因此不能得到高精度的暗物质密度轮廓,只有把视向速度样本与自行相结合才能给出^[8,38]。

3.3 恒星天体物理

恒星的物理参数有光度、元素丰度、质量等,其中质量是恒星最重要的物理参数之一, SIM 测定质量的精度为 1%,这对恒星的结构模型是有力的挑战。用 SIM Lite 测定质量的特点是什么,现以小质量 M 型星和褐矮星为例说明。太阳附近红矮星占有所有恒星的 70%,几乎是银河系全部恒星质量的 1/2。这些星的光谱型为 M、V=9~20 mag、质量为 0.08~0.50 M_{\odot} ,但是对 M 型矮星而言,质光关系 (MLR) 没有很好确立,从一个光度函数转换至一个质量函数是存在问题的。对质量小于约 0.20 M_{\odot} 的 M 型矮星,为了提供一个恒星演化模型,必须有正确的 MLR,因为这样小质量星的光度是与年龄和金属丰度有关的。最后,小于 0.1 M_{\odot} 的 MLR 是褐矮星研究的关键,因为只有知道准确质量,才能把一颗褐矮星的候选者确认为真正的褐矮星。近 10 年,红矮星的质量测定采用了红外谱斑干涉仪和 HST-FSG 相结合的方法,偶然也用视向速度方法。已发现的小于 0.20 M_{\odot} 的红矮星数量已从 1980 年的 5 颗增加至 22 颗, 0.50 $M_{\odot} > M > 0.50 M_{\odot}$ 的大质量红矮星的样本也有所增加。

M 矮星构成的双星系统很暗,不能进行精确的 RV 测量(由于轨道运动慢和分离光谱线很差),即使 SIM 能检测这些星,也是接近于它的临界能力。除了精确的轨道监测以外, SIM 在视差和质量测定时,也要求质量误差减小至 1%。例如,对近距双星 Gl 748 的研究表明红矮星的质量精确度为 2.4%, SIM 可以减小轨道半长径 (147±0.7) mas 的误差至 1/18 (0.04 mas),以及视差误差 (98.06±0.39)mas 减小至 1/10,这样质量误差仅 0.1%。恒星与褐矮星的区别是质量,天体的质量决定了天体核的温度是否足够高,以便维持氢的燃烧——这是一颗恒星的属性。L 矮星比 M 矮星质量小、更冷(约 1500~2000 K),至今已发现几百颗 L 矮星,但是还没有测量 L 矮星的质量;它们在 SIM 观测暗天体的极限内,可以被观测,如 GJ 1001 BC (距离为 13 pc,轨道周期为 4 a)^[8]。

3.4 特大质量黑洞和类星体

现在光学和近红外地面和空间望远镜的分辨率(如极大望远镜干涉仪和 HST 的分辨率分别为 10 mas 和 100 mas)不能直接测量一个类星体 0.1 pc 内部的运动(典型类星体的结构参阅文献 [39] 的图 1)。这个区域内包括中央 $10^9 M_{\odot}$ 的黑洞和它的吸积盘(其中包括相对论性喷流的起点和它们进入窄锥体的初始准直)。虽然已证实特大质量黑洞是巨大能量发射的原因,但是我们对于核周围的吸积盘和来自它们的相对论性喷流缺少详细的了解。研究在星系核处特大质量黑洞的结构需要高的角分辨率,现在只有 VLBI 能达到。SIM Lite 的观测将进入活动星系核的中心部分,探测特大质量黑洞掩蔽光线的谜,在测量微角秒尺度上运动和位置差方面的能力表明它能在 10 到几百个史瓦西半径尺度上研究 AGN,即可以研究吸积盘、喷流准直和双黑洞的轨道运动。SIM 可以回答^[8]: (1)AGN 的致密光辐射是否来自于一个吸积盘或者一个相对论性喷流?它是否与 AGN 是强射电或者是宁静射电有关? (2) 星系核

是否含有星系并合时的双特大质量黑洞? (3) 类星体射电核和光心之间的距离随着光度的变化而改变, 还是稳定不变的? SIM 还能通过天体测量位置的颜色漂移来检测 AGN 的模型。

以检测双黑洞为例, 星系核是否包含星系并合时的双特大质量黑洞? 这是了解星系核中非热活动演化的一个重要问题。SIM 可以像检测行星一样检测双黑洞, 即测量由于轨道运动引起类星体光心的位置变化。假如类星体光心的踪迹在天空是一个椭圆, 则可能为一个双黑洞, 由此可以直接测量它们的质量, 并估计双黑洞并合时间的长短; 如果运动是随机的, 则不是双黑洞。为何一个 AGN 黑洞系统可以绕另一个相似系统运动呢? 当两个星系核并合时, 在并合的最后阶段就可能发生此种情况, 形成 1 pc 大小的双黑洞的时间尺度 (10^6 a 量级) 远比星系并合时间 (10^8 a) 短, 而且一旦双黑洞间距小于 0.01 pc, 引力辐射只需在 10^6 a 内就能形成双黑洞。然而, 双黑洞间距在 0.01~1 pc 范围内能持续多长时间是未知的, 它取决于核与包围它的气体、恒星和其他黑洞相互作用时发射出多少质量。根据具体的过程, 如果寿命比宇宙年龄长, 相应双黑洞就多; 如果时间短于“Salpeter”时间尺度约 5×10^7 a, 则相应双黑洞很少。因此, 在星系核中寻找双黑洞将对星系的寿命和引起黑洞和类星体的过程给出重要的信息。

双黑洞的候选者是像类星体的一个天体, 但是它的绝对光度小于中央黑洞爱丁顿极限的 10%。这些天体很大, 但是很暗, 质量很小的第二个黑洞绕着主中央黑洞运动。虽然第二个黑洞并不处于较大黑洞吸积盘的内部, 但是它仍然从主盘的内边缘吸积, 在此情况中, 第二个黑洞绕第一个黑洞几个至几百个 μas 做轨道运动。有些情况, 第二个黑洞的光线是来自相对论喷流的束辐射, 而不是吸积盘的热辐射。ICRF 大部分源是这类耀变体, 当光辐射来自黑洞的非热喷流, 而不是以黑洞为中心的热吸积盘时, 看到的将是一个与时间相关的天体测量信号 (如一个开塞钻), 而不是一个椭圆。根据 12 a 的周期光度变化, OJ287 是一个双黑洞的候选者^[40]。如果它是一个双黑洞, 因为第二个黑洞进入和退出主黑洞的吸积盘, 则观测到的测光周期是轨道周期的一半。假定轨道周期是 24 a, 质量为 $10^9 M_{\odot}$ 的双黑洞系应有 0.036 pc 的间距。OJ287 的间距对应为 11 μas , 在 5 a 期间轨道运动约 14 μas , 所以, SIM 能对更近的系统 (如 3C273, M87) 检测更小质量的双黑洞。

除此以外, SIM 在天体物理方面的研究还有: (1) 广义相对论的验证。如 PPN 参数 γ 的精确测定 (精度达 10^{-6}), 它比用 Cassini 飞船跟踪资料得到结果 ($\gamma - 1 = (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$) 的精度高一个量级; 背景恒星在太阳系木星和土星附近, 不仅可以测定偏折的单极矩, 而且可以第一次测定由行星扁率引起的四极矩。(2) 在河外源的视自行中应呈现由于太阳绕银心运动引起的长期光行差 (最大值为 4.2 $\mu\text{as/a}$), 如果用 50 颗栅类星体的全天天体测量资料, 则可直接检测太阳在银河系中的加速度。(3) 在遥远类星体视运动的系统效应中 SIM 能检测太阳是否有一颗运行在椭圆轨道上的微暗的伴星, SIM 将能检测在我们附近任何不可见的引力体 (如果它的质量足够大), 计算表明 SIM 能检测到 100 AU 内质量大于 $0.33 M_J$ (木星质量) 和在 3160 AU 内质量大于 $330 M_J$ 的伴星。(4) SIM 能检测早期宇宙中低频引力波和各向异性等^[9]。

4 SIM 结构和观测的方式

4.1 SIM Lite 的结构

SIM Lite 望远镜是第一架空间的光学 (0.4~0.9 μm) 迈克尔孙干涉仪, 如图 1(a) 所示。它由 4 个基本的光学部分组成, 以下详述各部分的结构和作用^[9,29,41]。

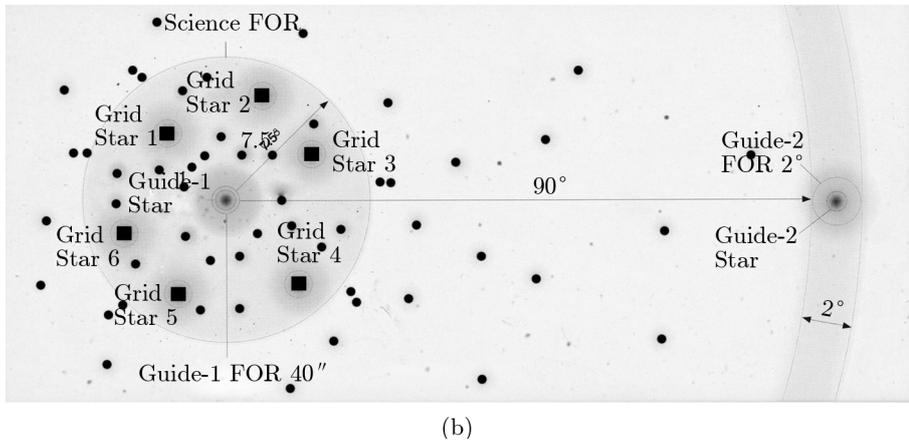
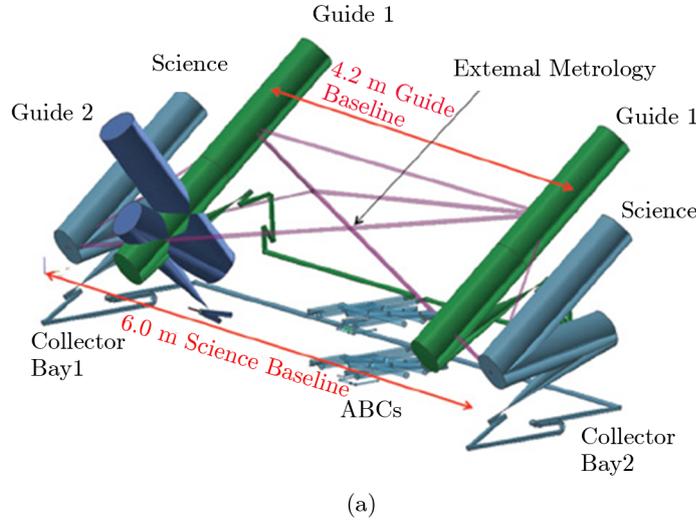


图 1 (a) SIM Lite 的结构; (b) SIM Lite 仪器对应的天空

4.1.1 科学迈克尔孙干涉仪

它的部件有定星镜、光束压缩器、精密瞄准镜 (Fine steering mirror, 简称 FSM) 和延迟线, 其工作原理分为 3 步: (1) 科学干涉仪从分开 6 m 基线的两个 50 cm 的定星镜收集光线。定星镜有 + 3.75° 转动范围, 它给出科学干涉仪直径为 15° 的视场。一旦定星镜指向一颗星, 在观测期间, 这些传动部件都锁住。在定星镜处的光束, 用主镜直径为 34.3 cm, 安装

误差 RMS 只有 8 nm 的一个共焦光束压缩器把每束光压缩至直径 4 cm。(2) 光线至 FSM, 它是一个 5 cm 的镜片, 与定星镜相比, 它有一个较小的运动范围, 但有较高的指向分辨率。当飞船姿态漂移时, 它用于跟踪恒星。路径光学机械装置 (pathlength optic mechanism, 简称 POM) 把光线转入延迟线, 延迟线的稳定性能为 1.4 nm, 用相对小的延迟调制, POM 扫描和稳定星光的条纹。FSM 和 POM 是动量互补的, 所以不干扰干涉仪的观测。延迟线给出两臂 40 cm 光程差的粗略改正, 科学干涉仪的每一个收集器有 2 条这样的延迟线, 在 15° 视场内两边能产生 160 cm 的光程差, 只有观测一个新的科学目标时延迟线才移动, 并锁住。两臂中的另一个收集器有静态的延迟线, 以保证干涉仪两臂光学设计的对称。(3) 最后, 光束传至仪器中心, 在干涉仪心脏的天体测量光束混合器 (astrometric beam combiner, 简称 ABC) 之内形成干涉条纹。

4.1.2 Guide-1 迈克尔孙干涉仪

它与科学干涉仪相似, 但是收集器的口径为 30 cm, 基线为 4.2 m, 视场仅 $40''$ 。它的指向与科学干涉仪目标星的方向相同, 并跟踪一颗导星, 控制科学干涉仪的姿态好于 $1 \mu\text{as}$ 。与科学干涉仪相比, 它的结构更简单化: (1) 因为在任何时间飞船把整个仪器指向 Guide-1 星, 所以不需要定星镜和延迟线; 因此, Guide-1 镜片是共焦压缩器的主镜。(2) Guide-1 选择了亮于 7 mag 的恒星, 所以 Guide-1 的口径 30 cm 是合适的。科学干涉仪的光学压缩器使光束大小减小 $1/12.5$, 而它把 Guide-1 和 Guide-2 光束大小减小 $1/7.5$, 所以下面光路的光束大小与科学干涉仪一样有 4 cm。(3) 由于包装的限制 Guide-1 基线减至 4.2 m。(4) 因为只需要运行 1 mm 路径, 所以在 Guide-1 中用在一个粗电机上的一块镜子改正光学延迟线。

4.1.3 Guide-2 高精度恒星跟踪望远镜

Guide-2 的定星镜设计与科学定星镜一样, 口径为 30 cm, 并有 2° 的转动范围, 它与 Guide-1 望远镜一个收集器安放在一起。其工作原理为: Guide-2 导星在该望远镜视场为半径 1° 的圆内, 其导星方向与 Guide-1 导星方向和科学干涉仪的基线相互垂直。观测时, 第一颗导星与目标星很近, 第二颗导星与它大致成 90° , 如图 1(b) 所示。当姿态控制系统漂移时, 粗调试阶段与科学定星镜一样把 Guide-2 望远镜放在导星上, 然后锁住。以后, FSM 在精细调试阶段起作用。Guide-2 望远镜以较高的指向精度跟踪第二颗导星, 监测科学干涉仪在另外两个方向上的姿态, 精度至 $50 \mu\text{as}$ 。当观测暗的目标时, 两个导星感知器也给出科学干涉仪指向的实时改正。

4.1.4 外部计量系统

测量干涉基线的变化, 即监测 SIM 基准点的相对位置, 它由精度达到 pm 量级的外部计量系统完成。该系统包括一组 6 个基准点 (其中 4 个基准点确定了科学干涉仪和导星干涉仪的基线)、许多光束发射器和 1 个计量源。与内部计量相同的原理, 外部计量采用了外差式计量束发射器。外部计量光束发射器不是测量干涉仪左和右臂之间的路径差, 而是直接测量每对基准点之间的距离。光束发射器送出在两个基准之间往返的光束, 9 个光束发射器用于监测具有 5 个基准点的外部计量桁架; 其中 2 个双角立方体安放在科学干涉仪定星镜的中心, 测量其基线; 另外 2 个基准点是三角立方体, 用以测定 Guide-1 的基线; 第 5 个基准点是反

射角立方体,用于监测桁架的非平面运动。最后,第10个计量器监测第6个基准点(计时角立方体),以测量 Guide-1 和 Guide-2 的漂移。计量源包括2个 $1.319\ \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 非平面环形振荡激光器,运行在 15 GHz。

除此以外,7 m 长的精确支撑结构 (precision support structure, 简称 PSS) 是一个高稳定结构部分,所有的部件都安放在高精度支撑结构上,如安放 SIM 的飞行系统,界面直接连至飞船的转接器。它保持温度环境,提供太阳屏蔽和保护。仪器实时系统用了 750 计算系统,在 ABC 中的感知器和在收集器中驱动器之间用反馈控制线连接采用 C++, 运行几百 Hertz^[29]。这4个部件一起完成3个基本量测量:白光条纹的延迟、内部延迟和基线变化的测定,精度为 20 pm;科学干涉仪测定前2个基本量, Guide-1、Guide-2 和外部计量系统测定科学干涉仪基线的变化。

至 2006 年 11 月已完成技术设计,其中应用了8个关键的新技术,进行了5个试验:微角秒计量试验 (microarcsecond metrology, 简称 MAM)、外部计量构架试验(即几把高精度的标尺像网络一样一起工作,也称为 Kite 试验)、Guide-2 试验、3条基线系统 (three-baseline system-level testbed, 简称 STB-3) 试验、温度-光学-机械 (thermo-opto-mechanical, 简称 TOM) 试验^[9,11]。通过试验表明,该设计已达到了 SIM 要求的天体测量精度。

4.2 观测方式

SIM 在沿干涉基线做位置的角测量时,所有天体测量信号是二维的。每次科学测量要求与第一次测量指向成正交的重复测量。根据观测目的,按观测方式可以分为小视场 (NA) 天体测量和大视场 (WA) 天体测量,即较差和全天天体测量,以及成像观测,以下详述这3种观测方式^[8,29]。

4.2.1 小视场天体测量

天体测量方法寻找外星行星采用了 NA 的观测方式,通过在 2° 内 (半径为 1°) 相对参考星的几次观测得到目标星的运动,设计中考虑了两点:(1) 目标和参考星快速转换,以消除长期项漂移引起的误差;(2) 在 NA 观测时用较差测量消除与场有关的误差,参考星选择天体测量参数 (位置、自行、视差) 已知的星。SIM 的相对天体测量运行在3个不同的模式,使得测量周期运动的精度为 $1\ \mu\text{as}$ 。这3种模式是:标准 NA 模式 (测量目标和参考星之间的延迟差)、无栅格 NA 天体测量 (gridless narrow angle astrometry, 简称 GNAA)^[42] 和栅格较差天体测量 (grid-based differential astrometry, 简称 GBDA)。因为 NA 的高效率,大部 NA 观测采用了标准模式。早期结果能用 GNAA 得到,而在栅格星的位置精度达到 $0.1''$ 时,才只采用 GBDA 模式。这3种模式的详细描述可以参阅参考文献 [8] 的附录。

4.2.2 大视场天体测量

科学定星镜提供了以 Guide-1 干涉仪视轴为中心的 15° 视场,称为“瓦面”,SIM 不能观测飞船单次指向 15° 以外的星。1个瓦中包括了在中心半径 7.5° 圆以内的任何目标,2个瓦面的中央相距 5.5° ,1个瓦的观测可以10分钟或几小时完成。1颗星的完整资料包括了几十或几百个“瓦面”,不同星的观测先在“瓦面”,以后进入“瓦面”的联测。联测有“窄角”、“栅格”或“广角”。为了 WA 参考架而选择的星,被称为“栅格星”。栅格是全天 1302 个重叠的

瓦面 (如图 2 所示), 每个瓦面平均有六七颗栅格星。在重叠区至少有 2 颗栅格星。SIM Lite 选择了 $V = 10.0$ mag 和距离 700 pc 的 K 巨星为栅格星。WA 观测是在天体测量栅格定义的框架下进行的, 这个框架是准惯性的, 栅格星的全天解将在第 5 章 5.1 节描述。

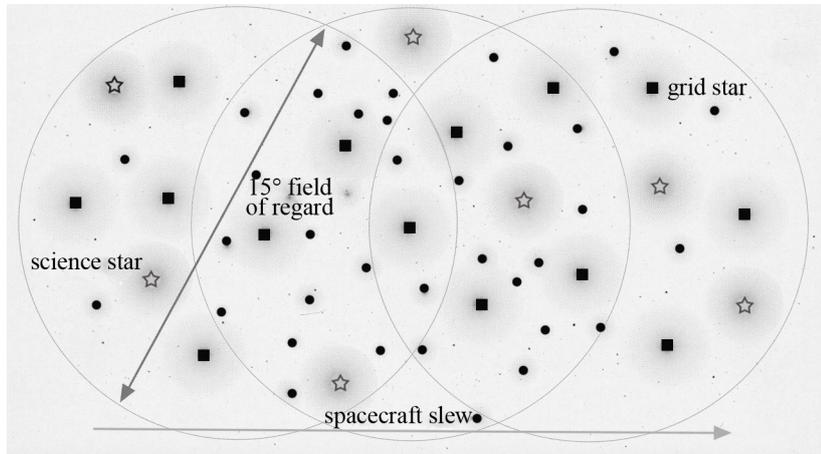


图 2 重叠的瓦面

4.2.3 成像观测

SIM 显示了空间光学波段的综合像, 它代表了下一代 UV/光学/IR 像望远镜的设计。现在这些波段的空间望远镜 (如 GALEX、HST 和 Spitzer) 都是“连续孔径”型的, 分辨率受到限制, 采用干涉法作为综合成像还是第一次。SIM 综合成像仪具有以下特点: (1) 仪器是一个简单的干涉仪, 而不像射电干涉仪是一个相关的干涉仪, 所以测量了 FOV 中光子的全部流量; (2) 为了达到微角秒精度, SIM 要求很高的相位稳定性, 这样, SIM 综合成像才具有大的动态范围 (动态范围为最亮恒星的峰值与检测到最暗伴星之间的星等差)。因为相位稳定性表明理论计算的 PSF 函数接近于真实的 PSF, 这样用理论计算的 PSF 可以从像中消除亮星的影响, 而只留光子噪声和疵点。初步模拟得到对 $V < 13$ mag 的目标星动态范围超过了 6 mag, 此值已经达到 VLA 的动态范围。然而, 如果用残余的仪器效应模拟, 则动态范围将达到 10 mag。最后, SIM 的综合像仅受到 FOV 中恒星的光子噪声的限制。

SIM 综合像模式也有新的应用, 即用于 HST/ACS/HRC 的观测极限外的面亮度大的目标。1999 年 Böker 和 Allen^[43]首先考虑了这个问题, 得到结论是在银河系球状星团核、星系中的 AGN 和近距星周围的尘埃盘的成像是可行的, 因此在 SIM 最初计划中包括了 M31 核区的恒星分布和运动学的观测。虽然现在仪器设计中减少了基线数目和除去无法达到的项目, 这样设计使得研究近距星周围的尘埃盘的成像很困难, 然而仍保留观测 M31 的计划。SIM 在光学波段综合成像的经验对今后设计天文成像的空间仪器是有帮助的。

5 SIM 参考架的构建

4.2.2 节已叙述了 SIM 定义的参考架。本章将详述构成 SIM 天体测量参考架、栅格星和类星体的选择, 以及 SIM 参考架与现在采用的 ICRF 之间的联系。

5.1 SIM 天体测量参考架

SIM 参考架是由 1302 颗栅格星和约 50 颗类星体组成。栅格星是目视 10~12 mag 的 K 型巨星, 它在全天每个瓦面 (直径 15°) 上均匀分布, 平均每个瓦面中有六七颗栅格星, 位置和视差的精度 $<4 \mu\text{as}$, 自行的精度 $<4 \mu\text{as/a}$ 。即使个别观测精度为 $12 \mu\text{as}$, 5 年的观测结果也将达到发射时所述的精度。

如果 SIM 参考架只有栅格星, 根据模拟试验表明它有 2 个缺陷: (1) 所有栅格星的视差具有相当大的偏差, 即天体测量中的零点误差; (2) 由栅格星组成的参考架会以任意的速度绕任意的轴旋转, 因此这个参考架是非惯性的。类星体, 特别是射电宁静的类星体很少或者没有光学喷流辐射, 距离在 1 Gpc 量级, 即在 μas 尺度上没有视差和自行, 它是加入至 SIM 参考架中的理想天体。通常参考架的指向和整体旋转与 2 个因素有关: (1) 组成参考架天体的位置和自行有关, 例如, 由于不知道精确的自行, 将使参考架随时间而变化。为了消除残余旋转, SIM 应观测 50~100 颗类星体。一般认为这些类星体的自行可以忽略, 实际上, 在栅格解中参考源的结构和误差传递的变化, 以及可能的区域系统误差决定了所用的河外源应当呈现全球分布。(2) 源的结构和变化如何影响 SIM 的天体测量也是未知的。以 ICRF 为例, ICRF 中极少是点源, 所以 ICRF 源对一定的标准而言都是不稳定的。如果一些天体的位置有 $10\sim 20 \mu\text{as}$ 的加速, 则应在参考架观测计划中删除, 也可作为感兴趣的天体物理的研究。SIM 方法对在 $7 \mu\text{as}$ 水平的位置和自行变化是敏感的, 因此也可以删除这些源, 或者作为天体物理的研究。许多源的运动在 $<7 \mu\text{as}$ 水平上是随机的, 如果参考架用了 50 颗源, 则其平均将好于 $4 \mu\text{as}$ 。

SIM 参考架中加入 23 颗类星体后, 经分析和模拟计算表明, 可以消除栅格参考架视差的偏差和大尺度的畸变 (区域系统误差) 以及残余旋转。类星体的连续光学辐射是非热同步加速辐射、围绕着黑洞的吸积盘的热辐射和冕的逆康普顿辐射的一个叠置, 这些将引起光学辐射的变化。SIM 能分辨大于几百个史瓦西半径的辐射区, 强射电和宁静射电类星体具有不同的辐射区, 所以根据它们有不同的结构和运动, 可以用一些类星体消除恒星栅格的区域误差, 以及用另一些类星体使射电和光学参考架保持一致。强射电类星体可以选自 212 ICRF 源, 在 SIM 15° 瓦面内约有一个源, 但是在南天和在银河系平面内极少; 宁静的射电类星体将选自亮类星体的光学巡天。USNO 在 2005–2007 年进行了类星体的测光观测, 选择了 50 颗 ($R \leq 16 \text{ mag}$, UBVRI 系统) 亮的类星体, 这些星的单次测量精度为 $16 \mu\text{as}$, 5 年中观测的最后精度为 $4 \mu\text{as}$ ^[44]。

5.2 栅格星的选择

SIM 栅格包括了全天均匀分布的 1302 颗 K 型巨星。选择 K 型巨星的原因是: (1) 在低银纬有许多 K 型巨星; (2) K 型巨星比矮星亮, 在 V 星等它比 F 和 G 矮星亮 4~5 mag, 同样

亮度 K 型巨星离太阳的距离比 F 和 G 矮星远 5~10 倍; (3) 随着距离增加, 由不可见恒星和行星伴星引起的天体测量运动小。选择的具体步骤是: 首先, 根据 Tycho-2 和 2MASS 中星的测光颜色 ($BVJHKs$)、自行和距离选择 K 型巨星的候选者。从近红外归化自行图中, 区分 K 型巨星和相同颜色的矮星。为了得到消光改正星等、颜色和距离估计值, 需要估计每个 K 型巨星候选者的目视消光。Tycho-2 星表的巨星加入地面巡天的补充, 总共选择了全球均匀分布约 170 000 颗 K 型巨星。然后, 每个瓦面中选择 6 颗栅格星, 总共选择了 7812 颗栅格星的候选者。这些星的距离至少 500 pc, 候选栅格星的平均目视星等 $V = 9.9$ mag, 其中 90% 的星等在 $V = 9.0 \sim 10.5$ mag 之间; 平均距离 $d = 600$ pc, 90% 的距离在 500~1000 pc 之间。为了剔除有不可见伴星的候选星, Frink 等人做了 K 型巨星 RV 稳定性研究, 早型 K 巨星 ($B - V = 0.8 \sim 1.1$ mag) 的视向速度稳定在 $20 \sim 30$ m/s^[45], 分析和模型计算表明一个适当的视向速度 (RV) 计划 ($30 \sim 50$ m/s) 将把 SIM 能检测到非天体测量运动的栅格星数目减少 1%~10%。2004 年 9 月开始用 La Silla 的 1.2 m Euler 望远镜进行为期 4 a 的高精度 RV (< 50 m/s) SIM 栅格星检测的联测, 在 1~2 a 内一半的候选者可以被观测 2 次, 以便从候选表中剔除一些有不可见伴星的栅格星。

2005 年 Makarov 和 Milman 曾用 1302 颗栅格星做模拟计算。他们以一颗栅格星的单次测量误差为 $10 \mu\text{as}$, 对不同的连续的网从 480 至 30 个瓦面做模拟计算, 得到位置、视差、自行和基线参数的精度分别为 $2.1 \sim 3.2$ 、 $2.4 \sim 2.9$ 、 $1.5 \sim 2.2$ 和 $0.31 \sim 1.6 \mu\text{as}$, 详细的模拟结果参阅文献 [46] 中的表 1。在栅格星方程中只加入 25 颗附加的、光学亮的类星体做数值模拟, 栅格星的视差精度改进约 28%, 整个栅格的 RMS 视差误差为 $2.8 \mu\text{as}$, 接近于预测值。99% 的可信度使栅格星的视差误差从 $6.2 \mu\text{as}$ (栅格中不包括类星体) 降至 $3.1 \mu\text{as}$ ^[46,8]。

5.3 SIM 参考架与 ICRF 之间的联系

SIM 参考架联系至 ICRF 有 2 个目的: (1) 能进行如 M87 射电和光学辐射中心的相对位置的科学研究; (2) ICRF 是现在所有天体测量资料的基础, 所以未来天体测量星表要求与 ICRF 的关系。因为 ICRF 是一个射电参考架, 当然联系必须用强射电类星体。用 2 个参考架共同的类星体推导射电和参考架的精度在参考文献 [8] 附录中讨论, 理论上讲, 射电核的光心和光学光心的间距应为零或者在 $\gg 10$ a 时间尺度上是稳定的。SIM 参考架比 ICRF 更加稳定, 所以联系误差主要由 VLBI 观测引起。ICRF 中的射电源是致密的, 通常大部分致密的平谱源在射电和光学波段是变化的, 基于 VLBI 超光速源的研究, 射电流量的变化与毫角秒尺度上结构的变化有关。众所周知, 至少 2 个源 (M87 和 3C273) 具有光学喷流, 但是没有可以与 VLBI 分辨率相比的光学图像。Perlman 等人^[47]用 Hubble 望远镜和 VLA 资料给出, 在亚角秒尺度上 M87 光学和射电“亮结”是相关的, 所以 ICRF 类星体在光心中是有漂移的。提高射电与光学参考架的联系精度可以有許多方法: (1) 避免选择变化大的目标; (2) 在 SIM 5 年的观测中可以重复测量, 并把残差大的删除; (3) 要求共同的类星体数目多。因为对每个观测目标任何补偿值是不相关的, 所以可以求平均; 而且 SIM 的观测时间可以在类星体数目和测量精度之间平衡, 所以, 源的变化使人们宁愿增加共同源的数目, 这样也容易确定超大残差的值。最后, SIM 参考架中的类星体是稳定的, 离我们最近的类星体 3C273 不适合作为微角秒量级参考架联系目标, 但是可以了解用更遥远类星体的变化对参考架联系的

影响。

SIM 给出的 1302 颗左右微角秒量级的栅格星表将来有可能成为代替 ICRF 的天球参考架。从 1990 年开, Fey 和 Charlot^[48]用 NARO 的 25 m VLBA 天线观测河外射电源, 已经得到 ICRF 中 388 颗源的结构(由于天线的位置, 大多数源都在北天)。Fey 等人首次用河外射电源在两个波段的结构指数(structure index, 简称 SI) 估计它们的天体测量质量, 评分从 0 至 100。源在 X 波段(3.6 cm) 的结构指数分为 1~5 的等级(注: 现在使用的 ICRF2 表中已变更和采用连续的 SI, 详细计算参阅 IERS Technical Note No.35), 其中 1 的天体测量质量的评分最高, S 波段(13 cm) 的质量评分仅为 X 波段评分的 10%。如果源的结构指数没有计算, 则其质量评分为零。Fey 给出了 USNO 的 N9903 解中 392 颗源的天体测量的质量评分, 其中评分在 50 分以上的有 259 颗源。作参考架联系需要选择亮的、致密的和天体测量质量高的源。SIM 打算观测约 100 颗河外射电源的光学对应体。虽然目前射电和光学辐射中心符合程度在 50 ms 左右, 但是为了选择致密的光学天体, 应当对已被选为参考架联系的这些星做高分辨率光学结构的分析。SIM 天体测量栅格星的位置为微角秒量级的, 其与 ICRF 的联系精度主要取决于河外射电源的位置精度。为了减小两者的联系误差, 应当选择尽量多的联系星, 但是受到观测计划安排的限制。如果用 50 颗源作为 SIM 栅格星表与 ICRF 的联系, 则联系精度为 35 μas (依巴谷星表联系精度为 600 μas)。Fey 初步选择了银道南北各 25 颗最亮 ($M_V \leq 18.0$ mag) 和天体测量质量高的源作为 SIM 与 ICRF 的联系^[49]。

6 SIM 与 Gaia 的不同点及互补性

6.1 SIM 与 Gaia 的不同点

SIM Lite 与 Gaia 在参考架上的特点不同。Gaia 与依巴谷一样, 最后得到的是一本巡天的观测星表, 其中包括极限星等至约 20 mag 的约 1×10^9 颗星的天体测量参数、测光和视向速度, 也可能作为未来的天球参考架。SIM 参考架的精度超过 ICRF 一个量级, SIM 将是 Gaia 星表的补充, 尽管 SIM 的源较少, 但是位置精度比 Gaia 更精确。表 2 给出了它们观测类星体精度的比较。

表 2 SIM Lite 和 Gaia 观测类星体的精度

飞行体	最后精度 / μas	单次精度 / μas	V /mag	观测 AGN 和 类星体的数目	观测次数	强射电 部分
SIM Lite: Science	4	11	13~18	50	150	80%
SIM Lite: Grid	4	16	16	50	150	40%
Gaia	25	150	<16	200	80~100	10%
	70	400	<18	20 000	80~100	10%
	200	1200	<20	50 000	80~100	10%

在外星行星检测上它们有 4 点不同。Gaia 也可以检测到许多外星行星, 然而对于个别观测而言, 它的天体测量精度将低于 SIM, 所以 Gaia 主要发现气体类的巨大行星, 如木星大小的行星。其次, 由于恒星光球活动、快速旋转, 以及这些天体周围的气体和碎片盘使得 RV 和成像受到限制, 而 SIM 模拟显示天体测量很少受到这些影响。其三, Gaia 不能观测 $V < 6$ mag 的 4806 颗星 (其中包括在星系中最亮的 O 和 B 星, 以及近域的超巨星), 这些星具有大于 1% 不确定性的依巴谷视差; SIM 能对距离 2.5 kpc 的星给出 1% 精度的视差, 所以可以用视差把星的角直径转为不确定性小于 1% 的物理半径。由于距离误差, 测光的绝对校正或对非常热的星不能观测远紫外处 SED (spectral energy distribution), 引起了这些星在 H-R 图中误差, 现在只有 SIM Lite 才能观测约束恒星的基本参数, 如半径、有效温度、光度和质量等^[50]。第四, 现在已发现 700 多颗外星行星, 显然行星也应在双星和多星系统中存在, 但是 RV 方法在间距几角秒或更近的双星系统中应用很困难, 至今没有外星行星在分光双星中检测到, 它们是 SIM Lite 小视场观测方式中最佳的候选者。SIM Lite 在类地行星探测上的特点是能检测地球似的行星。

6.2 SIM Lite 与 Gaia 的互补

SIM Lite 和 Gaia 两者是可以互补的。Gaia 巡天是用统计大样本研究银河系天体物理, SIM 则对少量的天体和特殊的科学目标做高精度的实验, 只有 SIM 能做银河系结构等的精细研究。另外, SIM 也是其他外星行星探测计划 (如 Kepler 和 COROT) 的补充。SIM 将给出主星的高精度视差、行星的轨道半径和轨道, 为 TPF (Terrestrial Planet Finder) 提供信息。

按照原计划, SIM 将在 Gaia 观测结束后发射, 因此对长期的天体测量项目给予机遇, 可以结合两者的观测资料做工作。以参考架为例, Johnston 等人认为 Gaia 与 SIM Lite 具有完全不同的特点, Gaia 是全天扫描的仪器, 观测积分时间是常数, 而 SIM Lite 是一个指向仪器, 观测积分时间根据观测天体的星等而变化, 所以两者建立的参考架是独立的 (SIM 参考架将由 1302 颗栅格星组成, 如果每个栅格中包括 23 颗类星体, 将避免视差和自行误差引起 SIM 坐标系的残余位置旋转和自行系统的残余旋转)。尽管 SIM Lite 比 Gaia 的精度高一个量级, 但是在最大尺度 (4π) 上是有缺陷的, 而 Gaia 在中间尺度 ($15^\circ \sim 50^\circ$) 存在区域误差, 此处 SIM Lite 达到最高的精度, 所以相互比较可以显示两者的不足, 并用联合结果进行改正^[51]。

7 我国的光干涉技术研究

1990–1994 年陕西天文台、南京天文仪器研制中心和上海天文台承担了中国科学院“八五”重点应用研究项目“光学天文中高空间分辨率应用和技术研究”。研制了恒星光干涉实验样机: 南北安放约 2 个 20 cm 定星镜 (望远镜), 基线长度为 10 m, 以白光为实验光源, 初步得到白光条纹, 但是环境条件 (恒温、恒压、恒湿) 达不到较高精度, 以及光学装置的抗震和稳定性较差, 所以条纹不稳定^[52,53]。由于经费和各方面原因, 这个项目在“八五”以后, 并没

有继续;因此,至今我国既没有光学或红外地面长基线干涉仪,更无研制空间干涉仪的计划。但是,也有单位坚持开展一些干涉技术的研究,如上海天文台光学天文技术研究室的“天文光干涉技术”课题组开展光干涉关键技术研究,发展短基线、小口径望远镜的综合孔径光干涉技术,并承担了国家自然科学基金委重点项目“斐佐型天文光学干涉望远镜的原理分析、总体方案和关键技术研究”,为今后我国研制地面或空间长基线干涉仪在技术上打下基础。

鉴于光干涉在天体成像、双星、天体角直径和高精度天体测量参数测定方面的应用,并且技术上具有一定的难度,建议可以有步骤地对其中一些技术进行实施,如:(1) pm 计量技术;(2) 恒温和抗震设施的研究;(3) 定星镜中高精度基准点角镜(面的垂直误差仅 $6 \mu\text{as}$) 的研制;(4) 低噪声和暗流 CCD 照相机的研制等。与 JPL 合作开展一些课题,如 NEAT 的研制等,经常关注 IAU commission 54 即光学和红外干涉专业委员会的活动和讨论。

致谢

作者在撰写本文时,中国科学院测量与地球物理研究所韩天芑研究员提供了有关中国科学院“八五”重点应用研究项目“光学天文中高空间分辨率应用和技术研究”的详细情况,与上海天文台陈力研究员对矮星系的质密度轮廓等问题进行了有益的讨论,作者在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Seidelmann P K, Johnston K J, Urban S, et al. Proceedings of the RGO-ESA Workshop Future Possibilities for Astrometry in Space (ESA SP-379), Noordwijk: ESA, 1995: 187
- [2] Urban S E, Seidelmann P K, Germain M, et al. In: Soffel M and Capitaine N eds. Proceedings of Journées 1999-systèmes de référence spatio-temporels & IX. Lohrmann-Kolloquium, Motion of celestial bodies, astrometry and astronomical reference frames, Paris: Observatoire de Paris, 2000: 131
- [3] Horner S D, Germain M E., Greene T P, et al. ASP conference Vol.203 (IAU Colloquium No.176), “The compact of large scale Surveys on pulsating star research”, San Francisco USA: Astronomical Society of the Pacific, 2000: 76
- [4] Horner S, Germain M, Harris F, et al. Proc. SPIE “UV, Optical, and IR Space Telescopes and Instruments”, 2000, 4013: 473
- [5] Bastian U, Röser S, Hoeg E, et al. Astron. Nachr., 1996, 317(4): 281
- [6] Danner R, Unwin S. Space Interferometry Mission: taking the measure of the universe. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 1999: 1
- [7] Unwin S. SIM: PlanetQuest Science with the Space Interferometry Mission(JPL Publication 2004-19). Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2004: 1
- [8] Unwin S C, Shao M, Tanner A M, et al. PASP, 2008, 120: 38
- [9] Davidson J, Edberg S, Danner R, et al. SIM Lite Astrometric Observatory. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2009: 1
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Space_Interferometry_Mission, 2012
- [11] <http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM>, 2012
- [12] 金文敬, 天文学进展, 2011, 29(3): 190
- [13] <http://www.rssd.esa.int/gaia>, 2012

- [14] Gouda N, Kobayashi Y, Yamada Y, et al. In: Jin W J, Platais I, Perryman M A C eds. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 248
- [15] <http://www.jasmine-galaxy.org/index.html>, 2012
- [16] Johnston K J, Dorland B, Gaume R. ASP Conference Series Vol.338 “Astrometry in the Age of the Next Generation of Large Telescopes”, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005: 46
- [17] Grillmair C J, Johnston K, Dorland B, et al. presented at “Wide-Field Imaging from Space” held at Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004: 18
- [18] <http://ad.usno.navy.mil/OBSS/>, 2012
- [19] Dorland B, Gaume R, Zacharias N, et al. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, Hawaii: The Maui Economic Development Board, 2006: E17
- [20] Dorland B N, Dudik R P, Dugan Z, et al. 2009, arXiv:0904.4516v1 [astro-ph.SR]
- [21] Hennessy G S, Gaume R. Proceedings of IAU Symposium No.261, Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 350
- [22] Shao M & Colavita M M. ARAA, 1992, 30: 457
- [23] Malbet F, Léger A, Shao M, et al. 2011, arXiv:1107.3643v2 [astro-ph.EP]
- [24] Goulliod R, Catanzarite J H, Dekend F G, et al. Proceeding of optical and infrared interferometry, SPIE, 2008, 7013: 70134T
- [25] <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, 2012
- [26] Catanzarite J, Shao M, Tanner A, et al. PASP, 2006, 118: 1322
- [27] Tanner A, Beichman C, Akeson R, et al. APSP, 2007, 119: 747
- [28] Traub W A, Beichman C, Boden A F, et al. 2009, arXiv:0904.0822v1 [astro-ph.EP]
- [29] Marr J C, Shao M, Unwin S, et al. SIM Lite Astrometric Observatory.(A Response to the Request for Information from Astro2010, the Astronomy and Astrophysics Decadal Survey Subcommittee on Programs)Pasadena, California: JPL, 2009: 1
- [30] Majewski S R, Skrutakie M F, Weinberg M D, et al. 2003, ApJ, 599: 1082
- [31] Grillmair C J, Johnson R. ApJ, 2006, 639: L17
- [32] Grillmair C J, Dionatos O. ApJ, 2006, 641: L37
- [33] Grillmair C J. ApJ, 2006, 645: L37
- [34] Sohn S T, Majewski S R, Muñoz R R, et al. ApJ, 2007, 663: 960
- [35] Pakzad S L, Majewski S R, Frinchaboy P M, et al. BAAS, 2004, 36: 1582
- [36] Brown W R, Geller M J, Kenyon S J, et al. ApJ, 2006, 640: L35
- [37] GoerdT T, Moore B, Read J L, et al. MNRAS, 2006, 308: 1073
- [38] Strigari L E, Bullock J S, Kaplinghat M, et al. ApJ, 2007, 657: 1
- [39] Elvis M. ApJ, 2000, 545: 63
- [40] Valtonen M, Nilsson K, Sillanpää A, et al. ApJ, 2006, 643: L9
- [41] Deken F G, Bloemhof E E, Dubovitsky D, et al. Proceeding of optical and infrared interferometry, SPIE, 2008, 7013: 70134U
- [42] Shaklan S, Milman M H, Pan Xiapei. Proc. SPIE, 2003, 4852: 161
- [43] Böken T, Allen R J. ApJS, 1999, 125: 123
- [44] Ojha R, Zacharias N, Hennessy G S, et al. AJ, 2009, 138: 845
- [45] Frink S, Quirrenbach A, Fischer, et al. PASP, 2002, 113: 173
- [46] Makarov V V, Milman M. PASP, 2005, 117: 757
- [47] Perlman E S, Biretta J A, Zhou F, et al. AJ, 1999, 117: 2185
- [48] Fey A, Charlot P. ApJS, 2000, 128: 17
- [49] Fey A L, Boboltz D A, Gaume R A, et al. AJ, 2001, 121: 1741
- [50] Aufdenberg J P, Ridgway S T, BASS, 2009, 41: 677
- [51] Johnston K J, Wehrle A E, Makaroc V, et al. Astro2010 Science White Papers, Washington: National Research Council Committee on Astronomy and Astrophysics, National Academy of Sciences, 2009: 79
- [52] 周必方, 毛伟军, 李再雄等, 天文仪器与技术, 1998: 34

[53] 王正明, 徐家岩, 肖金宏等, 天文光干涉测量. 北京: 科学出版社, 1996: 1

Projects of Astrometric Mission in the Era of Post Hipparcos: Space Interferometry Mission

JIN Wen-jing

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

Abstract: The projects of astrometric satellites such as FAME、DIVA、JASMINE、SIM Lite、Gaia、OBSS、JMAPS are briefly described. Their development process of space interferometers from 1980 to now is indicated, especially the current status of SIM project, which is a program on study of astrophysics with astrometric method, is given, such as the science, the structure of instrument, observing mode, the milestone of techniques and so on. The construction of SIM Lite reference frame, including selection of grid stars and quasars such as distribution, magnitude etc. as well as the linkage between SIM reference frame and radio reference frame ICRF-2 is presented. The comparison between the observing mode of Gaia and SIM is made and the complement of Gaia and SIM on astrophysics and reference frame is pointed. Finally, the “eight-five” key project of Chinese academy of sciences on optical interferometry is reviewed and some suggestions on the future work of this project are given.

Key words: optical interferometry; Michelson interferometer; reference frame; SIM Lite