

GAIA 计划与微角秒天体测量学

须同祺 金文敬 唐正宏 陆佩珍

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

欧洲空间局正在考虑的空间天体测量卫星计划 (GAIA 计划) 将对目视星等 V 亮于 15.5mag 的 5 千万颗目标进行位置、自行和视差的测定, 其精度为 $10\mu\text{as}$, 同时还对这些目标进行多色多历元光度测定。该计划可对星系距离尺度、恒星演化、银河系运动学和动力学以及参考架联结等方面进行深入研究。其开创的微角秒天体测量学亦将会对天体物理学、太阳系天体和参考架联结等方面的研究产生深远的影响。

关键词 天体测量: 空间天体测量 — 航天器 — 仪器: 干涉仪 — 天体物理

分类号: P129

1 前 言

依巴谷计划的成功实施为天体测量学开拓了一个崭新的领域, 将天体测量观测精度提高到一个新水平。但依巴谷计划中观测的极限星等是 12mag, 只能在 100—200pc 的一个小范围内, 以 10% 相对精度来测定距离。对于在恒星演化和结构、恒星动力学和宇宙学等研究中重要的研究对象 (如造父变星、天琴 RR 型变星和主序 O 型星等等) 的距离及其精确的测光资料, 则很少或根本没有观测。就是在这样的背景下, 欧洲空间局在其“Horizon 2000+”发展规划中, 提出了于下世纪初发射另一颗空间天体测量卫星, 即“以天体物理为目的的全球天体测量干涉仪 (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, GAIA) 计划”。

GAIA 计划直接测定的距离范围比依巴谷计划大, 其观测目标的目视极限星等为 15.5mag, 预计观测五千万颗星, 并且将观测精度提高到 0.01 mas , 即 $10\mu\text{as}$ 。这个测量精度相当于可在 8.7pc 距离处检测类地目标的移动, 或者在 1kpc 距离处测定与太阳直径大小相近的目标的移动。由于观测范围的扩大和精度的提高, 从而可以仔细校正恒星光度和年龄、元素丰度等的关系, 并详细了解银河系的信息等。所有这些将对整个天文学的发展起到极大的促进作用。本文主要介绍 GAIA 计划的科学目标和意义。

2 GAIA 计划的目标

依巴谷计划的完成表明在空间进行高精度天体测量的有效性。GAIA 计划则是依巴谷计

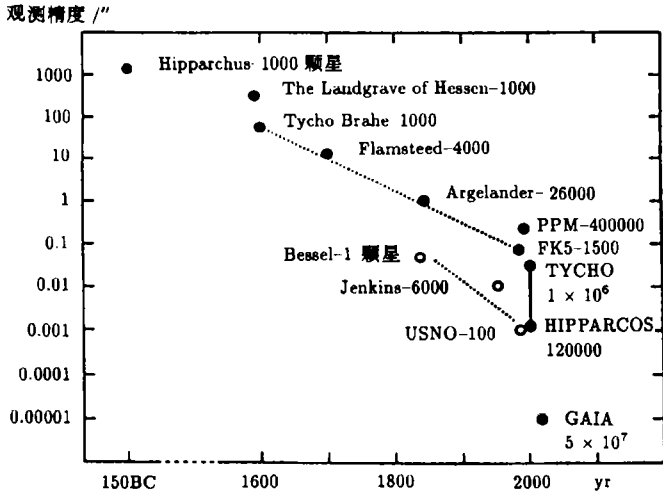


图 1 天体测量观测精度的进展^[1]

● 最好的恒星位置数据的误差 ○ 最好的恒星视差数据的误差

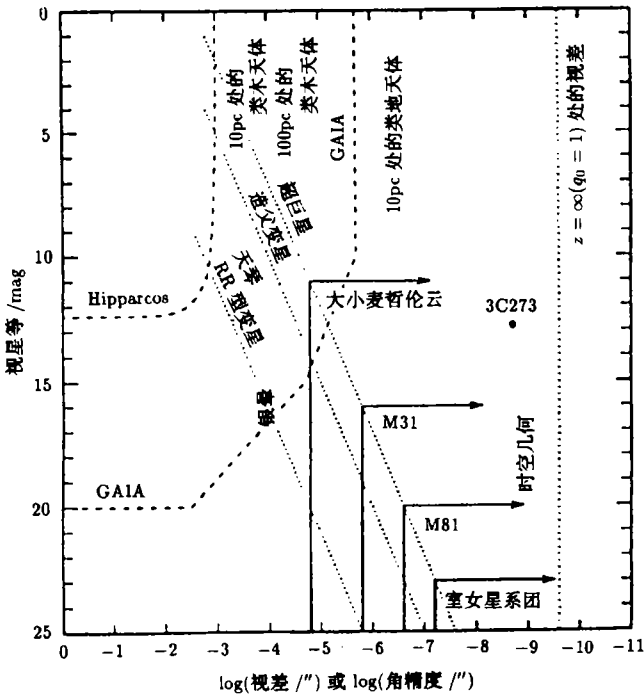


图 2 在微角秒精度下光学天体测量可研究的范围^[1]

划的进一步扩大和改进, 该计划在五年运行期间将达到下述目标^[1]: (1) 五千万颗目标星的位置、自行与视差高精度观测(包括依巴谷计划的 12 万颗星和第谷计划观测的 100 万颗星)。对

于 $V=15\text{mag}$ 的目标, 位置精度达 0.01mas , 即 $10\mu\text{as}$; 自行精度为 0.01mas/yr , 即在 20kpc 距离上自行精度达 1km/s ; 而视差精度是 0.01mas , 即在 10kpc 距离上视差的相对精度为 10% 。

(2) 多色多历元测光资料的获取。可见 GAIA 计划不但在观测对象的广度上前所未有, 其资料的多样性和预计精度也是空前的。

为了达到上述目标, 在 GAIA 计划中, 对观测和记录方式等都作了考虑。概括起来有如下几方面: (1) 采用连续扫描观测, 能同时测定视场中几百颗恒星间的角距离和多色光度。

(2) 采用基线长约 $2.5\text{—}3$ 米的菲佐型光学干涉仪, 以给出在扫描方向的高精度角分辨率。(3) 利用两个到三个光学干涉仪来进行广角(全天球)测量, 各干涉仪基线间互相成一角度, 并扫描同一大圆; 干涉仪基线间的“基本角”则由在每个观测大圆上的 360° 闭合条件确定。全天球按一定规则进行系统扫描, 所有天体测量参数最后用单一的全球整体调整过程来确定。

与依巴谷计划比较, GAIA 计划有三个方面的改进: (1) 增加了光学基线长度(从 0.3 m 到 2.5m); (2) 增强接收器的效率(用 CCD 代替析象管光子计数); (3) 对每个目标作多重扫描, 也即增加了观测时间, 提高了观测灵敏度。

图 1 是天体测量的精度两千年来的进展情况, 图 2 为微角秒精度下 GAIA 计划预计可观测的范围。由图 2 可见, GAIA 的观测范围将包括造父变星、天琴 RR 型变星、超巨星、银晕和麦哲伦星云中的一部分亮星。通过对这些目标的测定, 将会对天文学许多领域的研究起到推动作用。

3 科学意义

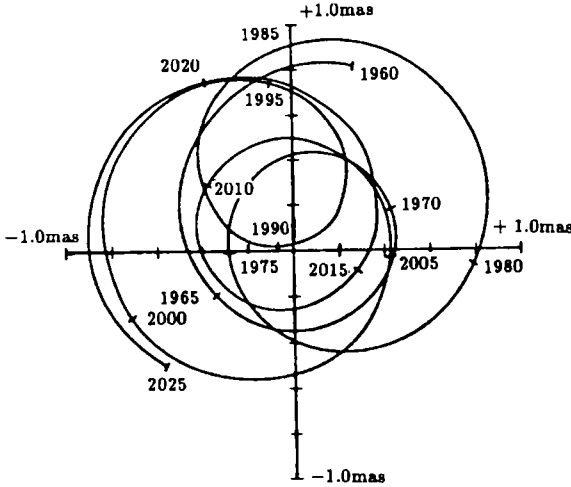
GAIA 计划将开辟天体测量学的新纪元, 使天体测量学进入微角秒阶段。由于观测对象的扩展、观测资料的丰富和观测精度的提高, 其意义已不再局限于天体测量学本身, 它对天文学的其它分支学科的发展也有着不可低估的意义。初步研究表明, GAIA 计划将会对以下各方面的研究作出重要贡献。

3.1 太阳系目标

虽然不少装有 CCD 的地面望远镜和空间天文观测卫星(如依巴谷卫星和哈勃空间望远镜(HST)等)都对小行星、自然卫星进行过观测, 但因观测星等的限制, 依巴谷卫星只观测了 48 颗小行星和三颗自然卫星(木卫二、土卫六和土卫八)^[2]; HST 或有 CCD 的望远镜则受到视场内参考星数不多的限制而效果不佳。随着观测星等的增加和精度的提高, GAIA 可对小行星带的约 2000 颗目标、自然卫星和外行星进行有效的观测。其结果可用于修正行星历表, 特别是小行星历表, 从而将对太阳系动力学参考架和恒星光学参考架的直接联系作出贡献。

3.2 不可见伴星

现在许多地面和空间观测计划中, 都有检测是否有其它太阳系存在的内容, 如探测其他行星系(Toward Other Planetary Systems, TOPS)计划等。检测方法有天体测量^[3]、视向速度测量^[4]和光度测量等。天体测量方法的基本设想是, 通过观测恒星相对于由此恒星及其行星组成的系统质心的运动, 检测有无类木或类地行星的存在。图 3 为在北黄极方向上距离 10pc 处看太阳系, 根据 JPL DE200 行星历表得到的 1960—2025 年间太阳绕太阳系质心运动的轨迹图。在太阳附近 150pc 处的最近的恒星形成区, 有几百颗年轻恒星(年龄小于一百万年)已被观测过。其中很多星(如 HL Tau)的周围有从 10 到 100 个天文单位大小的盘状组织, 盘中



有图3 太阳绕太阳系质心的视轨迹(1960—2025)^[5]

除此之外,还有取样、星际吸收和红化改正等问题。特别是零点的决定,因为没有一颗造父变星可以在地面上用三角视差法测定其距离,也就不能准确确定它们的绝对星等,从而决定周光关系的零点。天琴RR型变星又称短周期造父变星,它比造父变星暗,距离更远,同样也存在确定距离的问题。在依巴谷计划中,可直接测定这些目标的距离,但只观测到55个造父变星和26个天琴RR型变星。GAIA的微角秒观测可扩大观测范围,因此能使周光关系得到修正。对于天琴RR型变星,通过测定其绝对星等,还可研究绝对星等和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的关系。因为研究表明距银心10kpc的范围内,天琴RR型变星的金属含量随其与银心的距离而显著变化^[6]。

3.4 银河系质量

银河系自转速度可通过自行来确定。银盘上恒星的运动轨道近似为圆形。因而恒星作圆运动的离心力和它所受引力近似平衡。离心力决定于旋转速度和半径,而引力取决于物质的密度分布。由恒星自行计算银河系自转的奥尔特公式为:

$$\Delta(\mu_l \cos b) = (A/4.74) \cos 2(l - l_0) \cos b + B \cos b/4.74$$

式中 μ_l 为恒星银经自行, $l - l_0$ 为恒星与银心间的银经差, b 为银纬, A, B 为奥尔特常数。由精确到微角秒的自行测定值,就可以给出准确的银河系自转速度曲线,从而可决定银河系质量。这也将为研究银河系中暗物质提供条件。观测表明,星系周围有黑晕围绕,而很多矮星系比正常星系有更多的暗物质^[7],这方面的研究就需要视差和年自行的测定精度达到微角秒量级。

3.5 银河系动力学

通过对银河系旋臂、银盘和外晕的观测,可以研究这些区域的运动和结构。例如密度波理论认为,银河系在绕中心旋转时,旋臂的速度和恒星空间密度都是波动变化的。运动慢则恒星密集,反之则稀疏。这种波动既绕银河系中心呈环形传播,又沿半径传播。密度极大的波峰呈旋涡状分布,形成旋臂。旋臂中的星不是不变的,而是有进有出。以微角秒精度测定

气体和稠密尘埃,很可能是正在形成的行星。对于10pc处质量为 $0.2 - 1.0 M_{\odot}$ 的恒星,如要检测类太阳系行星,则要求 $10^{-5} - 10^{-4} (")$ 的观测精度^[5]。由于GAIA可对大量目标进行观测,因而有利于检测太阳系以外的行星系的存在和研究行星系的形成与演化。

3.3 星系距离尺度

造父变星和天琴RR型变星是星系距离尺度的指示器。造父变星一般较亮,在10Mpc处都能观测到,它们有很好的周光关系,这种周光关系可能还与颜色有关。根据其光变曲线很容易在许多星系中找到它们。但困难在于这种周光关系需要得到校正,即决定零点的问题。

旋臂和其前后背景星的自行, 如对较近的英仙臂 (2kpc) 的观测, 可能有益于检测这个理论。

3.6 球状星团

由于球状星团内恒星高度密集且较暗, 因此依巴谷卫星对球状星团的内部动力学和光度的校正很少或没有提供信息。但它提供了一个精确的参考系, 从而能利用地面长期观测的结果, 来得到团内成员星的自行。用主序星拟合的球状星团年龄和由哈勃常数 H_0 得到的年龄不相符合, 故首先要进行主序星绝对星等校正, 特别是和化学成分有关的转向点的校正。若年龄要精确到 10 亿年, 则距离的相对精度需达到 3%。在 GAIA 的观测范围内, 约有 20 个以上的这种星团, 如 47 Tuc、 ω Cen、M3、M5 和 M15 等都在 5—10kpc 范围内, 每个星团有 10 个以上的成员星可观测, 这样平均相对距离精度就有可能好于 3%。星团成员星自行的内部弥散度情况, 则和星团形成与演化的动力学模型有直接关系^[8]。

3.7 新星和类新星变星

新星距离可通过气壳膨胀速度模型来估计, 但这种方法受到模型的不确定性限制; 也可由新星极大光度和光度衰减速率的关系来确定, 但这里也存在着定出两者关系的零点问题^[9]。GAIA 对矮新星、AM Her 型星、共生星和激变双星等进行直接距离测定, 并可提供精确的光度测定结果来研究和区别各种可能的模型和机制。

3.8 双 星

通过双星观测, 利用开普勒定律可给出双星总的质量。同时由伴星相对质心轨道的相对大小可给出两星的质量比, 从而得到恒星质量。由恒星光心的非线性运动, 亦可为检测密近双星的存在提供条件。I 型超新星、毫秒脉冲星、低质量 X 射线双星等都与有物质传递和流失的密近双星有关, GAIA 计划可以从事这项研究。由天体测量结果可以给出恒星质量和轨道参数, 并为研究吸积速率、质量分布和运动性质提供信息。

3.9 引 力 波

引力波是以波动形式和有限速度传播的引力场。大质量天体的激烈活动, 如双星系公转、中子星自转、超新星爆发和中子星—中子星合并等均可发射引力波。引力波可对其后面的恒星的角位置产生周期性视差位移, 用这个性质可检测引力波的存在^[10,11], 另外通过对双星轨道参数变化的测定亦可检测其存在。双星不断辐射引力波, 能量逐渐变小, 从而使间距也变小, 公转周期变快。因而通过对双星公转周期变化等参数的观测, 可以检测引力波的存在。对密近双星的研究需天体测量精度达到 10^{-8} — 10^{-7} (″); 对于激变的短期事件, 其精度需达 10^{-6} (″), 而时间分辨率则要优于 10^{-4} — 10^{-3} s^[12]。GAIA 计划可提供相应的研究条件。

3.10 参考架的联系

依巴谷参考架需要通过地面或空间的附加观测来和河外参考架相联系。已知的类星体大都暗于 17mag^[13], 通过 GAIA 观测类星体等河外天体, 就可将恒星光学参考架直接联系到河外参考架, 而避免中间过渡的误差。观测表明这类目标的光学亮度可能存在变化^[14], 不同波段的辐射中心亦可能存在差异。在微角秒精度下才有可能研究这些问题。

3.11 其 它

对贫金属星 HD 140283 的硼丰度的测定引起了与这个元素的起因有关的问题: 是来自银河系诞生时的高宇宙线流, 还是来源于原发核聚变? 从宇宙线散裂可给出 B/Be 的比值, 而钹 (Be) 的丰度对该星是亚巨星或矮星是很敏感的, 因此通过精确的视差测定可解答这些问题。

通过对太阳附近银盘面密度的测定, Bahcall 认为已取得了银盘中暗物质存在的证据,

但 Gilmore 和 Kuijken 则持否定态度^[1], 认为 Bahcall 结果的不确定来源于 K 型巨星垂直银盘分布上距离的误差, 这只有通过微角秒级精度的测量才能作出判断。

在正常星系包括银河系周围, 有大量看不见的物质, 称为大质量致密晕源 (Massive Compact Halo Objects, MACHOs), 它们可能是褐矮星、中子星、老的白矮星或黑洞。这些天体具有类似引力透镜的作用, 可暂时改变背景星的亮度^[15,16]。当 MACHOs 在背景星前通过时, 可以测量背景星的自行以检测其存在^[17]。由于大麦哲伦云中的 MACHOs 的自行比银河系中的小 15 倍, 通过高精度测量可以确定 MACHOs 所在位置。

4 结 束 语

如上所述, 微角秒天体测量学在天文学发展的广阔领域中将会起着重要作用。由于 GAIA 计划比依巴谷计划观测精度提高 100 倍, 星数增加 500 倍, 并有多色多历元的测光结果, 得到的天体测量参数将为研究恒星和银河系精细结构与演化过程提供实测依据, 也可对银河系附近的一些目标给出精确的运动学和动力学结果。因为卫星将对 100—200pc 范围内大量类木和亚类木质量的目标进行观测, 这对研究太阳系外行星系的存在具有重要意义, 可为行星系形成理论作出显著贡献。另外, GAIA 将可能以 10^{-7} — 10^{-6} 的精度对引力 (参数化后牛顿) 光线弯曲项 γ 进行测定, 这亦将对现在的引力理论的发展作出贡献。

近代天体测量学正在飞速发展, 其观测手段日益多样化, 观测从地面推向空间, 观测波段则从光学波段扩充到整个波段, 精度也从毫角秒向微角秒推进。天体测量学的飞速发展无疑是由天文学中各分支学科的相互交叉、结合和需要所推动的, 而这种相互交叉、结合与需要正是整个天文学发展的动力之一, 相信这一发展过程仍会不断地持续下去。

参 考 文 献

- 1 Perryman M A C et al. In: Perryman M A C, van Leeuwen F eds. Future Possibilities for Astrometry in Space. ESA-SP-379, Workshop on the 'Future Possibilities for Astrometry in Space', Cambridge, UK, 1995, Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications Division, ESTEC, 1995: 35
- 2 Hestroffer D, Morando B. In: Perryman M A C, van Leeuwen F eds. Future Possibilities for Astrometry in Space. ESA-SP-379, Workshop on the 'Future Possibilities for Astrometry in Space', Cambridge, UK, 1995, Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications Division, ESTEC, 1995: 41
- 3 Gateward G. A. J., 1987, 94: 213
- 4 McMillan R S et al. Ap. J. Suppl. Ser., 1994, 212: 271
- 5 Burke B F et al. TOPS: Toward Other Planetary Systems, NASA, 1993, 30
- 6 Smith H A. Camb. Astrophys. Ser. 27, 1995
- 7 Ashman K M. Publ. Astron. Soc. Pac., 1995, 104: 1109
- 8 Tucholke H J, Brosche P, Publ. Astron. Soc. Pac., 1995, 104: 77
- 9 Jacoby G H et al. Publ. Astron. Soc. Pac., 1992, 104: 599
- 10 Fakir R. Ap. J, 1994, 426: 74
- 11 Fakir R. Phys. Rev. D1994, 50: 3795
- 12 Makarov V V. In: Perryman M A C, van Leeuwen F eds. Future Possibilities for Astrometry in Space. ESA-SP-379, Workshop on the 'Future Possibilities for Astrometry in Space', Cambridge, UK, 1995, Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications Division, ESTEC, 1995: 117

- 13 Schilbach E *et al.* In: Perryman M A C, van Leeuwen F eds. *Future Possibilities for Astrometry in Space*. ESA-SP- 379, Workshop on the 'Future Possibilities for Astrometry in Space', Cambridge, UK, 1995, Noordwijk, the Netherlands: ESA Publications Division, ESTEC, 1995: 105
- 14 Hook I M *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1994, 268: 305
- 15 Alcock C *et al.* *Nature*, 1993, 365: 651
- 16 Paezynski B. *Ap. J.*, 1986, 304: 1
- 17 Gould A. *Ap. J.*, 1994, 421: L71

GAIA Project and Micro-arcsecond Astrometry

Xu Tongqi Jin Wenjing Tang Zhenghong Lu Peizhen

(*Shanghai Astronomical Observatory, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

Abstract

The "Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, GAIA" project, which is being considered in the ESA, will observe 50 million stars brighter than 15.5mag, and get the data of positions, proper motions and parallaxes with the precision of $10\mu\text{as}$, along with multi-colour, multi-epoch photometry for these objects. The scientific results of the project will be used to probe deeply in many fields of astronomy, such as galaxy distance scale, stellar evolution, kinematics and dynamics of Galaxy, linkage among the optical reference frames and dynamical reference frames and extragalactic reference frames. Therefore, the micro-arcsecond astrometry will be contributed possibly to the developments of the study in the astrophysics, solar system objects and the linkage of reference frames.

Key words astrometry: space astrometry—space vehicles—instrumentation: interferometers—astrophysics