

文章编号: 1000-8349(2011)02-191-15



第二个天体测量卫星 (Gaia) 项目的进展

金文敬

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要: 简述了第二个天体测量卫星 Gaia (将于 2013 年 3 月发射) 项目的科学意义, 并给出了该项目的组织工作和最近的进展。描述了 Gaia 观测资料处理的基本原理, 以及与依巴谷观测资料处理的不同点。介绍了 Gaia 参考架构建的考虑, 以及为了构建微角秒量级的参考架, 应在自行中加入系统差改正, 如长期光行差、引力波效应、宇宙膨胀各向异性的影响、弱的微引力透镜和微引力透镜噪声效应等。介绍了 Gaia 光学参考架与射电参考架 ICRF-2 之间建立联系过程中, 选择河外射电源的准则, 其中包括源的核漂移和光学长期变化监测等。最后, 提出了我国现有设备参与支持 Gaia 的地基观测, 以及正在研制的 65 m 射电天线在射电天体测量方面可以开展的若干课题。

关键词: Gaia 参考架; 自行; 引力波; 微引力透镜

中图分类号: P129

文献标识码: A

1 引 言

第二个天体测量卫星 Gaia 将于 2013 年 3 月发射, Gaia 将观测 V 星等亮于 20 mag (或 $R \approx 21$ mag) 的近 10 亿个天体, 其中星系数为 $10^6 \sim 10^7$ 个, 类星体为 10^5 个。 V 星等亮于 10 mag 的位置精度为 $7 \mu\text{as}$, 对于 15 mag 天体的位置精度为 $12 \sim 25 \mu\text{as}$, 至 20 mag 精度为 $100 \sim 300 \mu\text{as}$ 。 85×10^6 颗天体恒星的自行切向速度精度好于 1.0 km/s , 440×10^6 颗天体的切向速度自行精度好于 10 km/s [1-6]。Gaia 能观测到 17 mag 的视向速度, 星等 $V < 17$ mag 的精度为 $1 \sim 10 \text{ km/s}$ 。测定距离精度达到 0.1%、1% 和 10% 的星数分别为 100 000、 11×10^6 (而依巴谷卫星在 10 pc 内仅有 200 颗星) 和 150×10^6 。在 16 kpc 处, $G=17$ mag 恒星的相对视差精度为 100%。由自行 (精度为 $50 \mu\text{as/a}$) 转换为切向速度的主要误差是视差, 因此将采用校正后的分光视差 [3]。Gaia 将综合天体测量资料 (位置和距离)、测光资料 (亮度) 和分光资料 (金属丰

收稿日期: 2010-09-08; **修回日期:** 2010-10-25

资助项目: 国家自然科学基金 (10878022, 10903022, 10903030); 中国科学院知识创新重要方向项目 (KJXC2-yW-T13)

度、分光距离和消光) 以达到其主要科学研究目标^[1-5]: (1) 银河系的起源、结构和演化。Gaia 全天观测资料中既有银河系的不同形态部分(银心、薄盘和厚盘、核球和晕), 也有不同物理特征的星族(极端星族、中介星族 I、盘星族、中介星族 II 和晕族的天体), 因此可以研究银河系的结构和演化的过程, 如大的星系是否由许多小星系的并合形成, 厚盘是否是早期盘与一个大的并合星系的混合等。(2) 恒星物理。从 Gaia 测光和分光资料可以测量基本的恒星参数(亮度、温度、化学成分和重力), 由此可知恒星的形成和演化, 如在小质量的恒星大气中保留了起始时的化石纪录, 也能进一步改进恒星内部的模型(对流核的大小、化学元素的内部扩散等)。(3) 外星行星的发现和atory。Gaia 可以用天体测量和行星凌主星时的测光方法发现新的外星行星, 决定其轨道参数和质量, 这些资料是行星系统形成、迁移和动力学演化理论模型的约束条件。(4) 太阳系物理。Gaia 将观测太阳系约 300 000 颗亮于 20 mag 的小行星, 以及行星卫星、彗星、近地小行星和海外天体。在地面上不能观测位于地球轨道内一个观测盲区内的的小行星, 然而 Gaia 位于太阳-地球系统的 L2 点, 能观测与太阳角距离 45° 的天体, 因此可能发现新的小行星^[6]。(5) 基本物理的研究。根据 Gaia 观测资料可以得到广义相对论中 PPN 参数 β 和 γ , 前者为引力弯曲效应, 即时空的弯曲度或时延; 后者为近日点漂移或 Nordvedt 效应^[7]。(6) 光学参考系。由于 Gaia 能观测 10^5 个亮于 20 mag 的类星体, 其位置的精度达到微角秒, 因此可以直接建立一个微角秒精度的、加密的光学参考系。

本文第 2 章讲述 Gaia 项目的进展, 第 3 章给出微角秒空间天体测量资料归算的模型, 特别指出了达到微角秒自行所需考虑的改正项, 第 4 章叙述 Gaia 光学参考架的建立, 以及它与现在使用的 ICRF2 的联系。最后, 根据我国现有和正在研制的仪器设备, 提出能在此课题上做贡献的若干建议。

2 Gaia 项目的进展

1997 年 6 月依巴谷星表发表后, 法国科学家向欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 提出了 Gaia 计划, 2000 年 ESA 批准该项目为基础项目。为了达到微角秒精度, 最初提出干涉式结构, 即 Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (简称 GAIA), 现在已改为与依巴谷卫星相似的结构, 但是各部件放大, 并且加入分光仪设备, 现在的名称 Gaia 并没有特定的含意。Gaia 卫星比依巴谷卫星在测定精度、极限星等和观测天体的数量上分别提高了至少 2、3 和 4 个量级。Gaia 包括 3 个光学望远镜, 其中 1 个望远镜为分光仪, 另外 2 个望远镜测量天体的位置, 它们的夹角为 106.5°, 同时观测两个不同的天区。每个望远镜由 3 个曲面的长方形镜子, 1 个光束混合器和 2 个平坦的长方形镜子组成, 每个望远镜中最大的镜面为 1.45 m×0.5 m。焦平面 (42×93 cm²) 有 106 个 CCD 组成的 930 兆个像素的照相机, 它的大小仅次于 PanSTARRS 望远镜的千兆个像素的照相机。两个望远镜把光线聚焦在焦平面上的 3 个不同区域的仪器: 天体测量、蓝和红波段的测光和视向速度分光^[1,4,8]。所有的信息将给出每个天体在空间运动的 3 维图像。Gaia 对全天进行扫描观测由卫星的 3 部分运动组成: (1) 以 60(")/s 的速率绕卫星旋转轴的运动(周期为 6 h); (2) 旋转轴与卫星至太阳方向成 45°, 它以 63 d 的周期绕该方向做进动; (3) 进动锥体轴方向的周年运动, 即 Gaia 绕太阳的运动。根据 Gaia 观测的扫描规律, 5 a 内在某天区平均观测 25~30 次, 每个天体观测几十

至 200 次不等, 平均观测 86 次^[1,6]。

2.1 重要机构

整个 Gaia 组织工作中有 4 个重要的机构: ESA, EADS Astrium, DPAC, GST。

2.1.1 ESA

负责整个项目, 包括经费、卫星发射和运行。

2.1.2 EADS Astrium

它是欧洲宇航防护和航天公司 (European Aeronautic Defence and Space Company, EADS) 的一个宇宙空间子公司, 由欧洲 50 多个公司组成的工业团队, 负责 Gaia 整架仪器设计和研制。至 2010 年 1 月 Gaia 仪器中的镜面已完成了 1/3。卫星将采用最新型的 Soyuz-ST/FREGAT 火箭发射, 点火后, 经过 1 个月 Gaia 将至太阳-地球系统的拉格朗日 L2 点 (离地球 1.5×10^6 km) 附近的 Lissajous 轨道。在发射时用一组 35 m 天线在澳大利亚 New Norcia 和西班牙 Cebreros, 以及 LEOP (Launch and Early Orbit Phase) 地面站: Kourou、Maspalomas、Perth 进行跟踪^[2,9]。Gaia 的寿命预计为 5 a, 也可能延长至 6~7 a。

2.1.3 DPAC (Data Processing and Analysis Consortium)

2006 年 6 月成立了 Gaia 资料处理和分析团组及执委会 (DPACE)^[4], DPACE 下设 8 个协调组 (Coordination Units) CU1—CU8 负责各项工作, 它们分别是系统构建 (O'Mullane)、数据模拟 (Luri)、核心处理 (Bastian)、目标处理 (Pourbaix)、测光处理 (Leeuwen)、分光处理 (Katz)、测光和分光信号变化处理 (Eyer), 以及天体物理参数 (Bailer-Jones)。在卫星发射前还将有 CU9, 其任务为星表编制。Gaia 有 6 个资料处理中心 (Data Processing Center, DPC) 分别在西班牙马德里附近的 ESAC (European Space Astronomy Center)、西班牙 Barcelona、意大利 Torino、英国 Cambridge、瑞士 Geneva 和法国 CNES, 每个 CU 至少有一个 DPC 支持。DPACE 由每个 CU 一个代表, 加上正副主席 (现在分别由 Mignard 和 Drimmel 担任), 以及 CNES DPC 的代表 11 人组成, 它与 CU 和 DPC 负责人一起专门检查 DPAC 的工作。至 2010 年 5 月已有 24 个国家 (除了欧洲国家外, 还包括美国、巴西和加拿大) 的 81 个研究所共 440 位科学家参加 Gaia 工作, 其中参加人数最多的是法国, 其次为意大利、英国、比利时、西班牙、德国等^[2,4]。

2.1.4 Gaia 科学团组 (Gaia Science Team, GST)

它由以下 7 位成员组成: 天体测量专家 Klioner 和 Lindergren、测光专家 Aerts 和 Jordi、视向速度仪科学家 Grebel 和 Randich、资料处理代表 Walton, 还加上 DPACE 主席 Mignard 和 ESA 项目科学家 Prusti^[1,4]。自 2009 年起, Aerts 和 Grebel 离去, 又有 Soubiran 和 Brown 两位加入^[4]。

另外, 为了支持 Gaia 项目的准备, 2006—2010 年欧盟支持了 ELSA (European Leadership in Space Astrometry) 项目, 它是一个研究训练网络 (Marie Curie Research Training Network), 培养和训练年青的研究者在天体测量和与其相关的课题工作^[10]。Gaia 曾在 2004 年 10 月和 2010 年 6 月召开 2 次重要的会议: “The three-dimensional universe with Gaia” 和 “Gaia: at the frontiers of astrometry”。

2.2 正在开展的工作

在 DPACE 的领导下, 各个协调和计算中心正在开展多项工作。

2.2.1 Gaia 卫星位置和速度的精确测定

在 Gaia 天体测量资料归算中, 光行差改正与卫星速度有关。为了使观测天体的位置达到微角秒精度, 要求测定卫星相对于太阳质心的位置和速度精度分别为 150 m (20 mas) 和 2.5 mm/s (1 mas/h); 而经典的多普勒和测距技术只能达到 6 km 和 8 mm/s。为了达到这个要求, 已提出两种方法。

2.2.1.1 天体测量方法

利用地面光学监测 (Ground Based Optical Tracking, GBOT) 网观测 Gaia, 使其位置和速度精度分别为 10 mas 和 10 mas/d。Gaia 卫星所在天空位置和星等与 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 约 18.5 mag) 相似。2008 年 4 月 Smart 等人以及 2008 年 7 月 Colas 和 Taris 分别用智利 La Silla ESO 的 2.2 m+WFI 和法国日中峰天文台 1.06 m 望远镜观测在 L2 天区的 WMAP。由于参考星表 UCAC2 的定位精度为 50/60 mas, 所以得到的定位精度仅为 50/70 mas, 日中峰 1.06 m 得到的精度略好一点^[11,12]。

2.2.1.2 整体天体测量解方法

Gaia 星表要求每一次观测精度为 10 mas, ESOC (European Space Operations Centre) 专家认为常规的定轨技术不能达到如此精度。Butkevich 和 Klioner 提出用 Gaia 本身的观测资料, 即把 Gaia 速度作为整体天体测量参数之一在观测方程中解算。假设速度改正值为卫星的轨道速度与卫星历书的速度的差值, 则有 3 种情况: (1) 速度改正值为固定值 ν_0 , 则产生一个附加的光行差改正, 即观测源的位置有一个系统漂移; (2) 速度改正值随时间有线性变化 $\alpha_0 t$, 则相应于每颗星有一个相同的附加自行; (3) 速度改正值正比与卫星的太阳系质心位置 $\alpha_0 \mathbf{r}(t)$, 则视差有一个系统漂移。这 7 个参数 (α_0 以及 ν_0 和 \mathbf{a}_0 的 6 个分量) 不能直接从天体测量观测确定, 速度改正值与天体测量参数一起拟合应有 3 个条件: (1) 历书速度误差中不存在上述这些信号, 即历书速度精度小于 1 mm/s, Gaia 符合此条件, 但是其他卫星不具备; (2) 在解算中引入约束条件, 以消除 ν_0 、 \mathbf{a}_0 和 $\alpha_0 \mathbf{r}$; (3) Gaia 的一些速度分量与其姿态有关, 在此只考虑卫星的平移运动, 不考虑任何卫星特殊的校正参数 (如姿态参数)。Butkevich 和 Klioner 曾用 2 048 颗星, 5 a 的观测做模拟试验, 得到了一个精确和可靠的解 (包括卫星速度和源的天体测量参数), 也得到卫星速度与样本中星数和星等的关系。最后, 他们认为如果速度改正值随时间的尺度取 6 h (接近 Gaia 的自转周期), 则至少用 106 颗星的观测资料才能测定精度为 1 mm/s 的卫星速度^[13]。

2.2.2 Gaia 观测的扫描规律

Holl 与 Lindegren 和 Hobbs 合作给出了 Gaia 扫描规律, 此工作与 CU3 的天体测量整体迭代法 (Astrometric Global Iterative Solution, AGIS) 有关^[14]。

2.2.3 近距星系的空间分布模型

Belcheva 用已有的星表: The Magellanic Clouds Photometric Survey: SMC, UBV_R CCD survey of the Magellanic Clouds, SuperComos Sky Survey 等, 给出恒星密度分布和麦哲伦星云的空间布模型。最后, 得到了在 Gaia 宇宙模型中近距星系的空间分布模型^[15]。

2.2.4 广义相对论的试验

Hobbs 等人对 Gaia 进行了广义相对论的模拟试验, 用蒙特卡罗方法产生了至少 10^8 颗基本星 ($G < 16$ mag) 的观测资料, 并用 AGIS 同时解算 5 个天体测量参数、飞船的姿态、仪器

几何参数的校正 (如基本角、 CCD 的几何学等), 以及一些整体参数, 这些参数中之一是参数化后牛顿参数 γ 。最后, 得到 γ 的精度为 1.3×10^{-6} , 此值高于用 Cassini 飞船得到的精度 2×10^{-5} ^[16-18]。另外, 由于 Gaia 测定的自行精度很高, 由此检测低频引力波引起了“自行”流, 因此可以把 Gaia 作为引力波的检测器^[19-22]。

3 空间微角秒天体测量的归算模型

1991 年 IAU 第 21 届大会 A4 决议在高精度天文观测的归算中采用广义相对论框架下定义的 4 维时空坐标系统: 太阳系质心天球参考系 (Barycentric Celestial Reference System, BCRS) 或地球质心天球参考系 (Geocentric Celestial Reference System, GCRS), 与其相应的时间系统采用质心坐标时 (Barycentric Coordinate Time, TCB) 或地心坐标时 (Geocentric Coordinate Time, TCG)。2000 年 IAU 第 24 届大会 B1.3—B1.5 决议对 1991 年 IAU 决议做了推广, 采用了一阶后牛顿近似。空间测地的 VLBI、SLR、LLR、地面至行星或飞船 (如海盜号火星着陆器) 的测距和空间天体测量卫星 Hipparcos 和 Gaia 的观测必须在后牛顿框架中进行归算^[23]。Klioner 等人提出在爱因斯坦广义相对论框架下空间微角秒天体测量观测的归算模型和算法, 下面简述该归算模型^[24-27]。

3.1 广义相对论框架下空间微角秒天体测量观测的归算模型

在此不讨论卫星的运动 (即观测者的运动), Gaia 在扫描条上的平面位置转至源位置的角坐标, 以及观测方程的平差方法。直接描述广义相对论框架下空间微角秒天体测量观测的归算模型, 如图 1 所示 BCRS 的观测量 s 如何归算至太阳质心观测源方向的量 l 。图中有 5

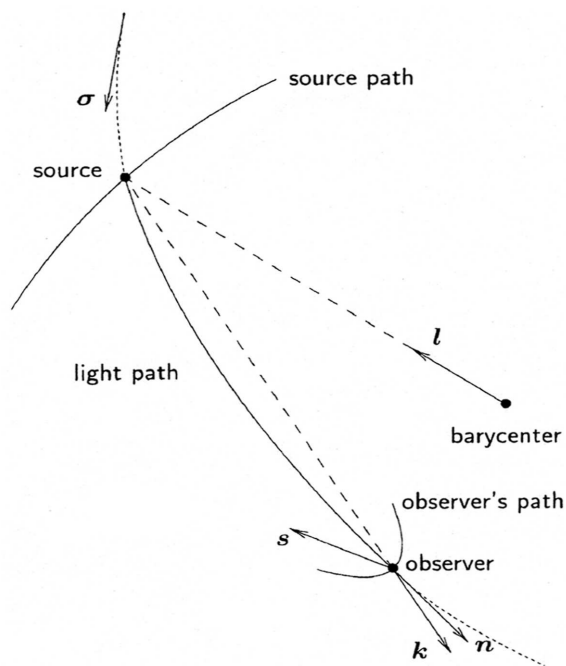


图 1 爱因斯坦广义相对论框架下空间微角秒天体测量观测的归算模型

个矢量： s 为观测者至源方向的单位矢量， n 为观测时刻光线的切向单位矢量， σ 为 $t = -\infty$ 时光线的切向单位矢量， k 为发射时刻时源至观测者的单位矢量， l 为从太阳系质心至源的单位矢量。图 2 表示观测太阳系外和太阳系内天体的归算步骤。

3.1.1 光行差影响

在观测时刻，由 s 变换为 n 时应考虑的。由于卫星的运动而引起光行差效应，它随着观测者质心速度的减小而减小。在要求 $1 \mu\text{as}$ 精度下，归算公式应为 c^{-1} (c 为光速) 的 3 阶项，同时卫星的 BCRS 坐标速度的精度应约为 10^{-3} m/s 。如果卫星的 BCRS 速度约为 40 km/s ，则一阶、二阶和三阶项的光行差分别约为 $28''$ ， 3.6 mas 和 $1 \mu\text{as}$ 。相对于卫星速度而言，高阶光行差效应是非线性的，也不能像地面观测的经典光行差一样分为周年和周日光行差。另外，卫星旋转运动也产生一个附加的可测量的光行差效应。由于太阳系绕银心的运动，长期光行差也需要估算。

3.1.2 引力光线偏折

n 转化为 $t = -\infty$ 时 σ 方向时应考虑的。在此应有 2 种情况：(1) 引力体在太阳系外。从 BCRS 原点至太阳系的有限距离在这一步归算中不起作用，3.2.4 节中描述这方面情况，1998 年 Sazhin 用 Hipparcos 星为引力体做了具体计算^[28]。(2) 引力体在太阳系内。如果把太阳系作为一个孤立的系统，引力偏折的后牛顿项有 4 个部分：1) 每个足够大引力天体 (太阳和 9 颗行星，以及 16 颗行星的卫星，如 Ganymede、Titan、Dione、Umbriel) 引力场的球对称部分，参考文献 [25] 表 1 中列出了这些天体和源之间最大角距时所产生的引力偏折效应，太阳和冥王星引起的最大和最小偏折分别为 $1.75''$ 和 $0.002533''$ ；2) 天体的非球对称效应，主要由于四极引力场产生的，对于太阳而言，这部分引起的光线偏折约为 $1 \mu\text{as}$ ；3) 引力体的平移运动产生引力磁场的影响，太阳和木星产生的影响分别为 0.1 和 $0.8 \mu\text{as}$ ；4) 引力体的旋转运动产生引力磁场的影响，太阳和木星产生的影响分别为 0.7 和 $0.2 \mu\text{as}$ 。因为天体平移和旋转的影响太小，可以不计。另外，源与太阳相距 $53'$ 以内，后-后牛顿效应仅达到 $11 \mu\text{as}$ ，现在还没有正在研制的卫星与太阳相距达到 $53'$ 以内，所以可以忽略。

在上述计算中还必须注意 3 个问题：(1) 引力体的运动。通常从历书中得到某一历元时太阳系引力体的位置和固定的速度，而任何历元时引力体的位置近似用 Taylor 展开式表示。1999 年 Kopeikin 和 Schäfer 提出了光线在任意运动天体引力场中传递的严格公式，建议采用推迟势 (retarded potentials) 形式表示爱因斯坦场方程的解，用推迟时刻计算引力体的位置，即 post-Minkowski 的一次近似式^[29]。这样，太阳系中引力体加速度，以及正比于速度二阶和高阶项的影响小于 $1 \mu\text{as}$ ，完全可以在归算模型中忽略。(2) 引力场的多极结构。众所周知，最大引力偏折是由带球谐 J_n 引起的^[30]，1991 年 Klioner 认为观测的源非常靠近行星表面时，只有木星和土星的高阶多极矩引起的偏折大于 $1 \mu\text{as}$ 。1997 年 Kopeikin 给出了计算 J_4 影响的公式，木星 J_4 影响为 $10 \mu\text{as}$ ，而土星的影响不超过 $4 \mu\text{as}$ ^[31]。由于木星和土星 J_6 的不确定性最大，假如木星和土星的 J_6 大于 Weissman 给出的值，则 J_6 的影响也应计入。(3) 引力位。光线在引力体包围层与引力体表面通过时，应当与光线在包围层外通过采用不同的引力位计算。通常巨行星的引力场采用均匀轴对称椭球体，但是 Weissman 给出的 J_2 、 J_4 和 J_6 小于椭球体给出值的 $1.7\sim 3.3$ 倍^[32]，所以行星外的引力位也可以用椭球体的球谐函数表示。

3.1.3 源的有限距离与引力偏折的耦合

即 σ 转化为 k 时应考虑的。这一步有 2 种情况: (1) 观测太阳系的天体, 从 $\sigma - k$ 和 $n - \sigma$ 关系可以直接得到 $n - \sigma$ 的关系 (如图 2 所示), 它是由引力场的球对称部分和天体的非球对称效应 (主要由于四极矩) 部分组成的; (2) 观测太阳系外的天体 ($|x_s| > 1\ 000\ \text{AU}$), 只需考虑太阳引力场的球对称部分的影响, 因为现在发射的卫星没有观测可以靠近太阳, 则 $\sigma = k$ 。对行星历书的要求是: 木星的质心位置的精度为 4 km, 其他行星的位置精度要求可以略低, 太阳的质心位置的精度为 400 m; 对于 Gaia 而言, 观测天体与太阳之间的角距离为 35° 时要求精度为 6 000 km, 卫星的质心位置的最低精度为 4 km。

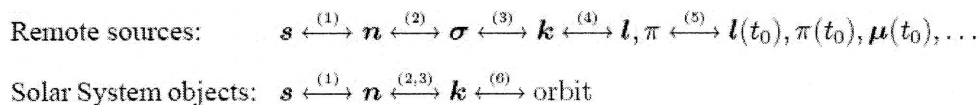


图 2 对太阳系外和太阳系内天体的归算步骤

3.1.4 视差

即由 k 转换为 l 时应考虑的。在转换公式中包括了正比于 π^2 的二阶效应。假如源与太阳系质心距离 $|x_s| \geq 1\ \text{pc}$ 时, 二阶效应小于 $3\ \mu\text{as}$; 在 $|x_s| \geq 2\ \text{pc}$ 时, 二阶效应可以忽略不计。

3.1.5 自行

在归算模式中源相对于太阳系质心的自行引起了 l 和 π 随时间的变化。假定源运动的简单模型为 $x_s(t_e^0) = x_s(t_e^0) + V\Delta t_e + \frac{1}{2}A\Delta t_e^2 + O(\Delta t_e^3)$, 式中 $\Delta t_e = t_e - t_e^0$, 发射时刻 t_e^0 对应于观测初始历元 t_0^0 , V 和 A 分别为源在发射时刻 t_e^0 的 BCRS 速度和加速度。由此推导 l 和 π 的时变公式, 即可以从观测得到的“视切向速度”和“视视向速度”推算“真切向速度”和“真视向速度” [25]。

3.1.6 太阳系天体的定轨

如果要求相对论模型精度达到 $0.1\ \mu\text{as}$, 则上述 (3.1.1—3.1.5) 讨论的各项要求如下。

(1) 卫星的质心速度要求达到 $10^{-4}\ \text{m/s}$, 如果在 GCRS 中决定卫星的轨道, 则卫星的 GCRS 速度转换至 BCRS 要求至 c^{-2} 项。

(2) 光线引力偏折应考虑以下的附加影响: 1) 观测源在木星 8 个角半径或土星 2 个角半径内时, 必须计及正比于引力天体速度的效应。2) 观测源在木星半径 1.4 倍以内, 即木星中心的 $42'' \sim 69''$, 应计入木星的旋转运动的影响 [25]。3) 在木星视半径 2.5 倍以内, 即木星中心的 $37'' \sim 61''$, 土星视半径 2.2 倍以内, 即土星中心的 $15'' \sim 22''$, J_4 的影响超过 $0.1\ \mu\text{as}$; 两个行星在视半径的 1.3 倍以内, J_6 的影响可能超过 $0.1\ \mu\text{as}$ [31]。4) 其他天体的半径 $L \geq (\rho)^{-1/2}$ 197 km 时, 应计入它们引起的引力偏折, 此处 ρ 为天体的平均密度 (单位 g/cm^3), 许多小行星满足此条件。5) 如果要求 $0.1\ \mu\text{as}$, 则源与引力体之间的角距应当比 $1\ \mu\text{as}$ 时的角距增大, 只有源与太阳的角距在 2.3° 内, 后-后牛顿光线偏折达到 $0.1\ \mu\text{as}$, 对于现在的空间计划, 可以忽略。6) 如果 $|x_s| \leq 85\ \text{pc}$, 随着技术的进步, 今后可能观测离太阳 22.7° 内源, 则有限距离和引力偏折的耦合应计入。

(3) 假如 $|x_s| \leq 5.5\ \text{pc}$, 则应计入二阶视差效应。

(4) 在自行大于约 $0.62(\prime)/a$ 时, l 应计入视自行的 c^{-1} 项。对太阳系外天体还需考虑其他问题(将在 3.2 节讨论)。

依巴谷卫星的观测精度仅毫角秒量级, 因此在观测资料中仅考虑 3.1.1 和 3.1.4, 并且采用了黄道坐标系。在空间微角秒资料归算中是否仍然采用太阳系质心参考系或者在固定历元的黄道坐标系^[26,33], 有待讨论。Kovalevsky 和 Zhu 等人曾提出采用银道坐标系^[34,35]。前者需加入银河系旋转引起的长期光行差、引力波效应等改正, 后者提出需要重新定义银道面和受到太阳至银心距离误差的影响。在参考文献 [36] 中图 2 和图 3 也指出采用太阳质心参考系, 还是银河参考系的问题。下面一节将叙述其他效应。

3.2 微角秒精度自行的改正项

对于毫角秒精度的依巴谷自行而言, 在观测资料处理中有些效应, 如长期光行差、引力波等, 影响太小可以忽略不计。对于微角秒精度观测资料处理, 必须考虑下面 5 个物理原因引起的系统差。

3.2.1 长期光行差漂移

根据 IAU 1991 年第 21 届和 2000 年第 24 届大会决议, Gaia 观测资料将在太阳系质心坐标系中处理。质心相对于银河系中心的旋转, 或者称为长期加速, 约 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 这个加速效应使得观测目标产生长期光行差。对于恒星而言, 每颗星的自行与空间速度的切向分量成正比, 与太阳质心到恒星的距离成反比, 它比长期光行差效应引起的自行量大 3 倍, 而且还包括了银河系较差旋转、非对称星流、局域和大尺度的扩展、盘的翘曲、旋臂的扰动和银河系的大星流的影响。类星体到太阳的距离为几 Mpc, 它本身的自行小于 $1 \mu\text{as}/a$, 近期很难观测到这个量, 但是空间天体测量卫星 Gaia 和 SIM (Space Interferometry Mission) 能观测类星体视自行的矢量场, 以检测长期光行差。太阳系质心加速引起类星体的自行, 根据类星体的银经和银纬, 该系统差约 $0 \sim 4 \mu\text{as}/a$ 。太阳系本动引起的残余旋转小于 $1 \mu\text{as}/a$, 小于长期光行差的 10 倍, 可以忽略不计^[37]。

3.2.2 宇宙起源的长周期引力波效应

1916 年爱因斯坦广义相对论预测在宇宙中存在引力波, 至今仅由某些双脉冲星轨道衰变率与引力辐射预测的能量损失速率相符合的事实间接证明了引力波的存在。引力辐射的影响分为 2 类: (1) 直接影响波中的能量密度耦合至物质; (2) 间接效应是引力波影响了遥远源的光线传播, 即光线在包括或不包括引力波的时空中传播是不同的。本节仅讨论在地面接收源辐射中寻找非常长的引力波 ($\lambda > 10^{-3} \text{ pc}$) 的影响。Pyne 和 Gwinn 等人推导了单色波在扰动 Einstein-de Sitter 时空中 VLBI 观测的时延公式, 用此公式决定了引力辐射背景引起的源自行:

$$\mu = \frac{1}{2} p h \sin p \eta \sin \theta (\theta \cos 2\phi - \phi \sin 2\phi), \quad (1)$$

式中 p 是角频率, h 是标准化的哈勃常数 ($h = H_0/100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), η 是在高斯标准参考架中的原时, (θ, ϕ) 为源的位置, θ 为波传递方向, 从北极 $+z$ 方向量度的角度, ϕ 为从 x 轴绕 $+z$ 的方位角, θ, ϕ 为单位矢量。1997 年 Gwinn 等人用 1979 年 8 月 3 日—1996 年 2 月 13 日 VLBI 资料 (499 颗射电源的 1 469 793 个时延) 和二阶切向球谐函数得到了全天源自行^[20,21]。Klioner 认为低频引力波引起了“自行”流, 所以把 Gaia 作为引力波的检测器^[19]。

3.2.3 宇宙膨胀各向异性的影响

3.1 节 Gaia 观测资料的归算是在 BCRS 中, 而 BCRS 是在太阳系孤立的假定下构成。人们忽略了 2 个效应: (1) 任何外部天体的潮汐力; (2) 宇宙背景的效应。前者在 Gaia 精度下可以忽略, 而后者需要在推导天体测量参数时计入, 因为视差精度为 $1 \mu\text{as}$ 可以测量离太阳系约 1 Mpc 的天体。这样需要构建包括宇宙膨胀背景的 BCRS 度规, 即考虑场方程的非线性。

Titov 认为如果宇宙膨胀是各向异性的 (即宇宙效应), 对于各向同性宇宙的哈勃定律 $V = HR$ (V 和 R 分别为退行速度和距离), 应由下式代替:

$$\begin{aligned} V &= (e_{33} \sin^2 \delta + \frac{1}{2}(e_{11} + e_{22}) \cos^2 \delta + \frac{1}{2}(e_{11} - e_{22}) \cos 2\alpha \cos^2 \delta) \\ &= (H + \Delta H_3 \sin^2 \delta + \frac{\Delta H_{12}}{2} \cos 2\alpha \cos^2 \delta) R \end{aligned} \quad (2)$$

式中 e_{11} , e_{22} , e_{33} 为膨胀张量的对角元素, 哈勃常数 $H = \frac{1}{2}(e_{11} + e_{22})$, ΔH_3 和 ΔH_{12} 描述哈勃常数的各向异性: $\Delta H_3 = e_{33} - \frac{1}{2}(e_{11} + e_{22})$, $\Delta H_{12} = (e_{11} - e_{22})$ 。由于各向异性膨胀引起的切向自行有:

$$\Delta \mu_\alpha \cos \delta = -\frac{1}{2}(e_{11} - e_{22}) \sin 2\alpha \cos \delta = -\frac{\Delta H_{12}}{2} \sin 2\alpha \cos \delta, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mu_\delta &= (e_{33} - \frac{1}{2}(e_{11} + e_{22})) \cos \delta \sin \delta - \frac{1}{2}(e_{11} - e_{22}) \cos 2\alpha \sin \delta \cos \delta \\ &= \Delta H_3 \sin \delta \cos \delta - \frac{\Delta H_{12}}{2} \cos 2\alpha \sin \delta \cos \delta \end{aligned} \quad (4)$$

在自行用二阶球谐函数的电和磁型矢量表示中, $a_{2,0}^E = \frac{\Delta H_3}{2}$ 和 $a_{2,2}^E = \frac{\Delta H_{12}}{12}$ 。如果在没有剪切的各向同性膨胀的宇宙中, 全天的哈勃常数相等, 则 $e_{11} = e_{22} = e_{33}$, 所以 $\Delta H_3 = \Delta H_{12} = a_{2,0}^E = a_{2,2}^E = 0$, 而且切向自行消失。他用 1980 年 4 月至 2008 年 9 月 3 724 组 4.3×10^6 个测地和天测 VLBI 观测的群延迟, 以及一阶和二阶球谐函数拟合, 得到结论: (1) 在 5 个红移区自行用一阶矢量球谐函数估算长期视差漂移, 偶极效应的幅度变化约 $15 \sim 24 \mu\text{as/a}$; 用一阶和二阶球谐函数一起计算求偶极效应的幅度与单独一阶矢量球谐函数法计算略有变化, 两种方法相差在 $5 \mu\text{as/a}$ 以内。(2) 四极效应随着射电源红移值的增大而变大, 对大多数远距离的源 (平均 $z = 2.6$), 四极效应幅度为 $(58 \pm 10) \mu\text{as/a}$, 这说明四极效应是由早期宇宙的原始引力波或者各向异性的宇宙膨胀引起的。另外, 在高红移处, 源的数量有限, 一阶和二阶球谐函数法之间存在相关, 相关系数达到 $0.8 \sim 0.9$ 。为了得到更可靠的结论, 需要增加南天源 ($\delta = -40^\circ$) 的观测^[38]。

3.2.4 弱引力透镜效应

类星体作用于光线传播路径上有两种方式: (1) 通过微引力透镜效应, 产生两个分开 $0.001''$ 的像, 而观测到的天体与背景类星体非常靠近, 这是一种稀有的现象, 在观测的 2×10^6 颗恒星中仅有一个微引力透镜效应; (2) 质量为 M 的天体 (碰撞参数 p) 引力体的作用使类星体的像相对于没有扰动的直线产生偏离 $2M/p$, 对于在太阳系附近具有星族的密度 $n = 0.1 \text{ pc}^{-3}$, 质量为 $0.1 M_\odot$ 的个别天体而言, $p = (\pi R_H n)^{-1/2}$, 式中 R_H 为银河系晕的半径,

在此情况下观测者看到的与河外天体的真位置偏离 $1 \mu\text{as}$ 。本节仅考虑第二种方式。VLBI 可以测量这种弱微引力透镜效应,它在微引力透镜效应(或称为引力折射效应)以下,光线偏折的角距离范围为几个至几百个 μas ,引起了类星体位置的变化。例如 Sazhin 等人用依巴谷星表中 HIP23106(视差 $(3.43 \pm 0.61) \text{ mas}$, $\mu_\alpha = -(4.00 \pm 0.57) \text{ mas/a}$, $\mu_\delta = -(2.55 \pm 0.78) \text{ mas/a}$, 光谱型为 K1 IIIp, 质量为 $4 M_\odot$) 计算得到射电源 ICRF 0459-753 的引力折射效应,即 1952—2050 年该源的位置变化。在 1986—1996 年间由 VLBI 观测得到该类星体的赤经和赤纬变化分别为 7.5 mas 和 1.5 mas (Eubanks 认为 ICRF 0459-753 是一颗射电星)。由此得到 2 个结论: (1) 由于前景星的自行(类星体与可见星的角距在 $1' \sim 2'$), 引起天球参考架旋转矩阵非对角系数约 20 年 $1 \mu\text{s}$ 量级的时变, 因为大部分银河星的自行是未知的, 只有微角秒精度时参考架才是惯性和均匀的; (2) 微角秒精度的天体测量星表也是不稳定的, 每 20 年需要重新编制^[28]。观测在双星和聚星系统边缘的源时, 还需考虑由于子星引力场引起的光线偏折。另外, 在 1969—1983 年观测脉冲星 PSR B0525+21 时, 发现到达时刻有 3 ms 的残差; 在排除伴星和旋转不稳定因素后, 假设在观测者视线附近有大质量的引力体, 计算得到该引力天体的质量为 $330 M_\odot$, 而有如此大质量的恒星是不可能的; 因此引力体为一个黑洞, 这说明脉冲星的观测可以检测银河系中的暗物质^[39]。

3.2.5 微引力透镜噪声

微引力透镜噪声是具有大碰撞参数微引力透镜事件的微弱效应, 这些不确定的微引力透镜事件太弱或者太快, 所以不能检测。不确定的微引力透镜事件的数目远比确定的微引力透镜事件多。它引起恒星位置的随机变化, 其变化幅度和发生的瞬间是不可预测的; 它对在空间天体测量基础上编制的星表影响多大还无法估计, 这决定于所采用银河系的模型, 因此曾有许多学者讨论了微引力透镜噪声对位置、视差和自行测定的影响。以 Hosokawa 等人的工作为例, 他们从理论上估计了由于银河系物质(恒星和晕族大质量天体物理致密天体 MACHO, Massive Astrophysical Compact Halo Objects) 的引力透镜效应使河外天体产生的位置变化, 随着引力体和视线之间的相对运动(引力体的自行、地球的运动等), 偏转角的变化引起了类星体的自行。假如盘星的柱密度、银心至太阳的距离、盘的标长和标高分别为 $46 M_\odot/\text{pc}^3$ 、 8.5 kpc 、 3.5 kpc 、 300 pc , 盘星的质量密度分布采用指数模型; MACHO 的分布是轴对称的, 它的密度和分布的核半径分别为 $7.9 \times 10^{-3} M_\odot/\text{pc}^3$ 、 2 kpc , 质量密度分布采用等温模型, 在视线的圆柱体内只有 1 颗星或 1 个 MACHO, 由此计算得到由银河系物质引起的位置偏离与银经和银纬的关系, 银道附近由于盘星引起的偏转大于 $10 \mu\text{as}$ (见参考文献 [40] 中的图 5), 而 MACHO 的质量为 $0.1 M_\odot$ 时, 影响很小, 如果它的质量为 $0.5 M_\odot$, 则其影响不可忽略。如果盘星垂直于视线和沿视线的速度分量相等, 约 200 km/s , 质量等于太阳的质量, 观测者与引力体之间的距离为 10 kpc ; 而 MACHO 速度投影在天球所有方向和距离的速度等于常数 180 km/s , 与观测者之间的最小距离为 2 pc , 则可以计算银河系物质引起类星体自行随银经和银纬的变化(见参考文献 [40] 中的图 9(b))。类星体的自行在所有方向大于 $7 \mu\text{as/a}$, 在近银道平面, 银经 $|b| < 60^\circ$ 类星体的自行大于 $10 \mu\text{as/a}$ ^[40]。

2002 年 Belokurov 和 Evans 首次做了微引力透镜噪声对 Gaia 观测影响的模拟试验, 结果显示在任何瞬间, 20 000 颗源中仅有一颗源的位置测量受到微引力透镜噪声的影响, 他认为这是无偏的随机误差, 可以不考虑^[41]。

4 Gaia 参考架

在第 1 章中已阐明了 Gaia 发射的科学目标, 其中天体测量学家最关心的是微角秒精度的 Gaia 光学参考架。它的构建与以下 2 个问题有关: (1) Gaia 参考架是由多少颗类星体组成, 选择这些类星体的标准是什么, 以及 Gaia 参考架的精度; (2) Gaia 参考架与 ICRF2 的联系, 包括对射电参考架的要求。

4.1 Gaia 参考架的构建

在考虑引力闪烁效应 (随机微引力透镜效应), 光线在银河系引力势阱中非稳定的引力弯曲 (引力波), 以及太阳在银河系中的加速和银河系的加速等效效应之后, 天体测量参考架的精度最终确定为 $1 \mu\text{as}$ ^[42,43]。众所周知, 依巴谷参考系是由 12 万颗星组成的, 极限星等为 12.4 mag。Gaia 能观测至 20 mag 的类星体, 所以其参考系可以直接由类星体组成。法国巴黎天文台与巴西 Valongo 天文台合作收集了各种文献给出 LQAC (Large Quasar Astrometric Catalog) 星表, 其中包括 113 666 颗类星体的资料, 如最佳位置、ubvgriz 波段测光、红移、几个射电波段的流量密度和绝对星等^[44]。Andrei 等人用 LQAC 与 USNO B1.0、GSC2.3 和 SDSS Data Release 5 校核得到一个 ICRS 的光学对应表 LQRF (Large Quasar Reference Frame) 星表, 其中包括 100 165 颗类星体, 今后 Gaia 参考架的源将在 LQRF 中选择^[45]。Gaia 观测精度随着星变暗而降低, 为保证参考架的精度, 它将由亮于 18 mag 的类星体构成, 这方面工作正在进行之中。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 1304 颗栅格星组成^[46,47], 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, 但是在最大尺度上是有缺陷的, 而 SIM Lite 在中间尺度 ($15^\circ \sim 50^\circ$) 存在区域误差, 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^[43]。

4.2 Gaia 与射电参考架的联系

Gaia 与射电参考架的联系涉及射电源核和光心的关系, 类星体的光学辐射可能有 3 个来源: 在黑洞周围吸积盘的温度辐射, 无温度冕盘的辐射, 以及对于一组绝对强射电的类星体而言来自节点的无温度辐射。射电源要求选择致密的、亮的 QSOs 光学对应体 (Gaia 选择亮于 18 mag, SIM 选择亮于 16 mag)。Oiha 等人选择了 214 颗源, 在 2005—2007 年用 NOFS (Naval Observatory Flagstaff Station) 1.0 m Ritchey-Chretien 反射望远镜和 2k CCD 照相机, 南天观测用 CTIO (Cerro Tololo Inter-American Observatory) 1.0 SMARTS (Small and Moderate Aperture Research Telescope System) 望远镜和 4 000 CCD 照相机在 Johnson *R*、*V*、*B* 和 *I* 波段进行以 Landolt 为标准星的测光观测, 加上其他观测计划中的 21 颗源, 总共给出 235 颗 QSOs 的测光结果。其中 134 颗源与 VCV06 (Véron-Cetty 和 Véron) 星表为共同源, 36% 的 *V* 星等存在 1 mag 之差, 有 10 颗源相差 3 mag^[46]。

对于不同的星等, Gaia 的观测精度也不同。星等为 15 mag 和 18 mag 位置精度分别为 $16 \mu\text{as}$ 和 $70 \mu\text{as}$, 20 mag 精度为 $200 \mu\text{as}$ 。Gaia 与 ICRF2 联系中需选择 $V \leq 18 \text{ mag}$, 结构指数为 1-2 的射电源, 经选择 ICRF2 中只有 70 颗满足条件。通常射电源越暗则精度越高,

所以在 NVSS 中选择 447 颗暗的射电源 (流量低于 100 mJy, 比现在 ICRF 源的流量弱 20 倍, 既不是 ICRF 源, 也不是 VCS 源) 而光学对应体亮于 18 mag 在 EVN 上进行观测, 以便选择更多的源作为参考架的联系^[48-50]。观测结果显示: 在 X 波段, 432 颗源的流量在 1~190 mJy 范围内, 平均为 26 mJy; 在 S 波段, 399 颗源的流量在 8~481 mJy 之间, 平均为 46 mJy。这些源的流量分别比 ICRF 和 VCS 源弱 27 和 8 倍。398 颗源在两个波段都检测到, 且谱指数的平均值 α 等于 -0.34 (70% 的源 $\alpha > -0.5$, 即表示具有核的源)。

在参考架的联系中, 除了考虑第 3.2 节所述的系统差以及外, 还有射电源的自行。1979—2003 年测地 VLBI 网已观测了 3 555 次 24 h 的观测组, 其中大部分用了 40 架天线; 在这 20 a 中观测源也不断地增加, 已从 1986 年的 65 个增至 610 个射电源; 因大部分天线在北半球, 所以北半球源的分布比南半球均匀。用 1979—2003 年测地 VLBI 资料 SOLVE 软件解算得 580 颗射电源的自行, 约 $50 \mu\text{as/a} \sim 1 \text{ mas/a}$, 167 颗射电源的自行精度为 $20 \mu\text{as/a}$, 348 颗射电源的自行精度为 $50 \mu\text{as/a}$, 50~60 颗源自行精度在 3σ , 赤纬和赤经自行的 RMS 分别为 $30 \mu\text{as/a}$ 和 $26 \mu\text{as/a}$ 。射电源的自行与射电源结构有关, 例如 4C39.25 是一个超光速的源, 也是厘米波段最亮的一颗致密源, 它有 4 个子源: a, b, c, d, 其中 b 以超光速从靠近 c 处向着 a 运动, d 相对 a 和 c 不动, 可能是 4C39.25 的核。1990—1992 年用 5 架天线在 8.4 和 2.3 GHz 两个波段对该源相对于 0920+390 的 3 次相位参照观测, 得到 b 的自行为 $\mu_\alpha = (90 \pm 43) \mu\text{as/a}$, $\mu_\delta = (7 \pm 68) \mu\text{as/a}$ ^[52,53]。今后如何决定自行, 以及自行与射电源结构的关系还有待进一步的研究^[54-56]。在本星系群中及其外, 星系 (包括类星体) 的自行测定也是美国以后 10 年 (2010—2019 年) 研究课题之一^[56]。另外, 还应考虑下述的偶然误差。

4.2.1 核漂移

VLBI 在不同观测频率得到河外射电源位置的差值称为核漂移。喷流的不透明度引起的位移 ($>1 \text{ pc}$) 大于通常的核漂移, 核漂移量随着频率增加而减小。由此可知 VLBI 观测得到的位置是射电源的喷流位置, 而光学位置 ($6\ 000 \text{ \AA}$) 的光辐射来自中央核或者围绕核的吸积盘, 核漂移将影响参考架的联系。2008 年 Kovalev 等人以 29 颗亮的河外射电源为例研究河外源的位置与观测频率的关系, VLBI 2.3 (13 cm) 和 8.6 GHz (3.6 cm) 引起核漂移最大达到 1.4 mas, 平均为 0.44 mas。理论估计为 0.2~0.3 mas, 而射电 (4 cm) 与光学之间的核漂移为 0.1 mas^[57]。用多频率的 VLBI 可以测量河外射电源的核位移效应, 如 MOJAVE-2 的 4 频观测 (8.1、8.4、12 和 15 GHz), VLBA 的多频观测 (1.4~15 GHz) 等, 并加以改正。

4.2.2 类星体光学流量的长期变化

为了解光心与星等变化, 以及射电和光学位置的关系, 天文学家在光学波段持续监测 AGN 短期和长期变化。如法国波尔多天文台用子午环监测 50 颗类星体, 其中有些已观测 10 a^[45,48,49]; 从 1969 年起 Florida 大学 Rosemary Hill 天文台开始用 76 cm 反射望远镜照相检测 200 多颗 AGN 的光学流量的变化, 至 1993 年已得到 9 000 张底片, 26 000 次露光。Smith 等人研究了在 22 a 中 60 颗强射电类星体 (其中包括了光学剧变的耀变体) 光变曲线。在样本中 28 颗有明确的周期性变化, 17 颗比较勉强, 有些变化幅度相对于测量噪声 $\pm 0.1 \text{ mag}$ 而言很小, 15 颗没有明显的变化。经分析后, 除了 2 颗变化超过 0.1 mag/a (4C 29.45 和 3C 279) 外, 光度增亮有 31 颗, 光度衰弱的有 29 颗, 对应斜率分别为 -0.028 和 0.031 mag/a 。通过目视、结构函数和功率谱 3 种方法得到 42 颗有增亮和衰弱现象, 周期为 6~9 a, 平均周期为 8.9 a, 其

中比较明显的 25 颗星的光变周期为 $9.2 \text{ a}^{[58]}$ 。SDSS 给出了类星体光度变化最大的样本, 约 25 000 个类星体, 该样本包括 2000 年 4 月—2002 年 9 月 EDR (Early Data Release) 和 DR1 (First Data Release) 的 479 张分光底片资料 (每张底片包括约 500 个星系、50 颗类星体和 50 颗恒星), 讨论了光度幅度变化与时滞、光度、波长和红移的关系, 得到结论: (1) 光度幅度变化随时滞的指数定律而增加; (2) 光度越亮的类星体光度变化越小; (3) 波长越短的类星体光度变化越小; (4) 类星体越远光度变化越大; (5) 射电辐射强的类星体比射电辐射弱的类星体光度变化更大; (6) 检测到具有 X 射线辐射的类星体比没有检测到 X 射线辐射的类星体的光度变化更大。上述结果很难用吸积盘的不稳定模型、Poissonian 模型 (如多个超新星或星的碰撞) 和引力透镜这 3 类模型来解释。后两个理论模型与观测结果不符; 吸积盘不稳定模型还需定量的研究, 以便与观测结果比较; 也可能不是单个模型可以解释, 而是几个原因相结合才产生类星体光变曲线的变化^[59]。

5 结 束 语

Gaia 是当前天体测量中最重大和最前沿的项目, 这个领域集中了 400 多位科学家, 各项工作正在有步骤地开展。

Gaia 发射后, 计划于 2012—2017 年进行观测, 2015 年发表中间星表, 最后星表将在 2021 年发表, 其中包括位置、视差、自行、测光、分光、视向速度、证认、恒星天体物理参数和变化的信息。尽管 Gaia 能得到银河系 $10^7 \sim 10^8$ 颗恒星的高精度的 3 维位置、3 维速度、年龄、丰度等信息, 有利于天文学家了解银河系的起源、演化和更精细的动力学模型, 但是 Gaia 并不能在天体密集区, 如银道面和球状星团的中心进行观测。视向速度分光仪的极限星等 $V = 17 \text{ mag}$, 所以许多恒星没有视向速度, 需要其他空间和地面的巡天 (如 SIM、STARRS 和 LSST) 给予补充, 特别是暗星 (暗于 $G = 20 \text{ mag}$) 的视向速度可以应用地面 4 m 和 8 m 的大视场多天体光纤分光仪得到, 同时还能得到恒星参数和化学丰度。近红外卫星 JASMINE 可以扩充 Gaia 在薄盘、旋臂和星形成区的巡天, 地面观测还可以校正 Gaia 的测光、分光和恒星参数的算法^[3]。

2006 年成立了 GBOG (Ground-Based Observations for Gaia) 工作组, 它是一个全 CU 结构 (pan-CU), 以便协调和支持 Gaia 的地面观测计划。虽然 Gaia 是一个自校正的仪器, 但在改进、测试、校正或确认 Gaia 的资料处理需要地面观测作为辅助资料, 从现在至 2012 年安排了一些地面观测, 有些观测一直延续至 2017 年。这些地面观测包括: (1) 为了校正 Gaia 的测光和分光需要观测 250 颗分光测光标准星, 精度为 1%, 现在正在用意大利、墨西哥和 ESO 的仪器进行观测; 以后, 还将用法国和智利的 3 个阶梯光栅摄谱仪观测 1 400 颗星 (作为视向速度的标准星)。为了对天体物理参数测定需要建立一组参考星, 以校正分类/参数的算法。(2) 为了光学跟踪 Gaia 卫星, 现在正在对 WMAP 进行光学观测, 并打算建立一个地面小望远镜网络, 以便在 5 年内对 Gaia 进行观测。在黄极建立天体测量、测光和分光的两个标准天区 ($1/ \text{平方度}$)。(3) 为了 ICRF2 和 Gaia 参考架的连接, 正在用 EVN 和 VLBA 对弱的河外射电源进行观测。(4) 其他观测计划有关小行星分类 (CU4) 和恒星参数 (CU8) 试验, 以及建立小和中型望远镜网作为变星补充观测。(5) 发射后, 开始地面短

期的加强观测, 以便得到流量警戒的检测和认证^[60,61]。

尽管我国不是 Gaia 项目的参与国, 但是上海天文台、紫金山天文台和云南天文台已参与“ A ground-based follow-up network for the solar system objects observed by Gaia ”项目组。通过与 Gaia 参与国的合作, 如上海天文台与意大利都灵天文台多年的合作, 有望参与 Gaia 在相对论, 银河系的起源、结构和演化, 参考系和太阳系物理方面的工作, 建议我国相关单位能积极参与 GBOG 的有关工作。最后, 上海天文台正在研制 65 m 射电天线, 该设备将对天体测量领域, 如测定星系和类星体自行、河外弱射电源的定位、河外射电源的不稳定性(如核漂移和引力波效应)等方面做出贡献。

致谢 作者与上海天文台沈有根研究员在引力波、宇宙膨胀各向异性等问题进行了有益的讨论, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Lindegren L. Proceedings of the IAUS 248, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 217
- [2] Lindegren L. Proceedings of the IAUS 261, Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 296
- [3] Bailer-Jones C A L. Mem. S. A. It., 2004, 77: 1
- [4] <http://www.rssd.esa.int/gaia>, 2010
- [5] Mignard F. Proceedings of Symposium“*The three-dimensional universe with Gaia*”, ESA SP-576, The Netherlands: ESA Publications Division, 2005: 5
- [6] Mignard F, Cellino A, Muinonen K, et al. Earth Moon Planet, 2007, 101: 97
- [7] Mignard F, Klioner S A. Proceedings of the IAUS 261. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 306
- [8] Lindegren L. Proceedings of Symposium“*The three-dimensional universe with Gaia*”, ESA SP-576, The Netherlands: ESA Publications Division, 2005: 29
- [9] Milligan D. DPAC Newsletter No. 4, Nice: Observatoire de la Côte d’Azur, 2009: 2
- [10] Lindegren L, Bijaoui A, Brown A G A, et al. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 529
- [11] Thuillot C W, Magdalena S, Alexander H A, et al. Proceedings of the IAUS, Transactions T27A, Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 63
- [12] Altmann M. DPAC Newsletter No.2, Nice: Observatoire de la Côte d’Azur, 2008: 5
- [13] Butkevich A, Klioner S. Proceedings of the IAUS 248. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 252
- [14] Holl D. Newsletter No3, Nice: Observatoire de la Côte d’Azur, 2009: 6
- [15] Belcheva M, Livanou E, Kontizas M, et al. Proceedings of the ELSA conference 2010, Gaia: at the frontiers of astrometry (in press)
- [16] Hobbs D, Holl B, Lindegren L, et al. Proceedings of the IAUS 261. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 315
- [17] Anderson J D, Levy G S, Renzetti N A. Proceedings Of the IAUS 114, Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1986: 329
- [18] Vecchiato A, Lattanzi M G, Bucciarelli B, et al. A&A, 2003, 399: 337
- [19] Klioner S. DPAC Newsletter No.5, Nice: Observatoire de la Côte d’Azur, 2009: 3
- [20] Gwinn C R, Eubanks T M, Pyne T, et al. ApJ, 1997, 485: 87
- [21] Pyne T, Gwinn C R, Birkinshaw M. ApJ, 1996, 465: 566
- [22] Kipeikin S M, Gwinn C R. Proceedings of IAU Colloquium 180, New Zealand: University of Waikato, 2000: 303

- [23] Soffel M, Klioner S A, Petit G, et al. *AJ*, 2003, 126: 2687
- [24] Klioner S, Kopeikin S. *AJ*, 1992, 104: 897
- [25] Klioner S. *AJ*, 2003, 125: 1580
- [26] Klioner S. Proceedings of Symposium “The three-dimensional universe with Gaia”, ESA SP-576, The Netherlands: ESA Publications Division, 2005: 212
- [27] Kopejkin S. *Celestial Mechanics*, 1988, 44: 87
- [28] Sazhin M V, Zharov V E, Volynkin A V, et al. *MNRS*, 1998, 300: 287
- [29] Kopeikin S M & Schäfer G. *Phys. Rev. D*, 1999, 60: 124002
- [30] Klioner S. *Soviet Astron*, 1991, 35: 523
- [31] Kopeikin S M. *J. Math. Phys*, 1997, 38: 2587
- [32] Weissman P R, McFadden L-A, Johnson T V. *Encyclopedia of the solar system*, San Diego: Academic, 1999: 962
- [33] van Leeuwen F. *A&A*, 2005, 439: 805
- [34] Kovalevsky J. A & A, 2003, 404: 743
- [35] Zhu Z, Liu J. The Journées 2008 “systèmes de référence spatio-temporels: Astrometry, Geodynamics and Astronomical Reference System”, Paris: Paris Observatory, 2009: 249
- [36] Klioner S, Soffel M. *A&A*, 1998, 334: 1123
- [37] Kopeikin S M, Makarov V V. *AJ*, 2006, 131: 1471
- [38] Titov O. Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry working meeting, Bordeaux: Observatoire Aquitain des Sciences de l’Univers, 2009: 14
- [39] Larchenkova T L, Doroshenko O V. *A&A*, 1995, 297: 607
- [40] Hosokawa M, Ohnishi K, Fukushima T. *AJ*, 1997, 114: 1508
- [41] Belokurov V A, Evans N W. *MNRAS*, 2002, 331: 649
- [42] Makarov V V, Johnston K J, Zacharias N. *BAAS*, 2006, 38: 675
- [43] Johnston K J, Wehrle A E, Makaroc V, et al. An Astro2010 Science White Paper submitted to the 2009-2010 Decadal Survey Committee, Washington: National Academy press, 2009: 79
- [44] Souchay J, Andrei A H, Barache C, et al. *A&A*, 2009, 494: 799
- [45] Andrei A H, Souchay J, Zacharias N, et al. *A&A*, 2009, 505: 385
- [46] Ojha R, Zacharias N, Hennessy G S, et al. *AJ*, 2009, 138: 845
- [47] Makarov V V, Milman M. *PASP*, 2005, 117: 757
- [48] Bourda G, Charlot P, Campion J-F Le. *A&A*, 2008, 490: 403
- [49] Bourda G, Charlot P. Proceedings of the annual meeting of the Société Française d’Astronomie et d’Astrophysique (SF2A)-2009, Paris: the French Society of Astronomy and Astrophysics, 2009: 33
- [50] Bourda G, Charlot P, Porcas P, et al. Proceedings of the 9th European VLBI Network Symposium on the role of VLBI on the Golden Age for Radio Astronomy and EVN Users Meeting, Bologna, Italy: EVN, 2008: 56
- [51] Fey A L, Boboltz D A, Ojha R. *ASPC*, 2008, 395: 366
- [52] Guirado J C, Marcaide J M, Alberdi A, et al. *AJ*, 1995, 110: 2586
- [53] MacMillian D S. The 10 th Anniversary Of the VLBA, *ASPC*, 2005, 340: 477
- [54] Zharov V E, Sazhin M V, Sementsov V N, et al. Proceedings of the IAUS 261, Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 50
- [55] Titov O. The Journées 2007 “systèmes de référence spatio-temporels; The celestial reference frame for the future”, Paris: Paris Observatory, 2008: 16
- [56] Reid M J, Brunthaler A, Menten K M, et al. An Astro2010 Science White Paper submitted to the 2009-2010 Decadal Survey Committee, Washington: National Academy press, 2009: 379
- [57] Kovalev Y Y, Lobanov A P, Pushkarev A B, et al. *A&A*, 2008, 483: 759
- [58] Smith A G, Nair A D, Leacock R J, et al. *AJ*, 1993, 105: 437
- [59] Vanden Berk D E, Wilhite B C, Kron R C, et al. *ApJ*, 2004, 601: 692

- [60] Soubiran C. DPAC Newsletter No7, Nice: Observatoire de la Côte d'Azur, 2010: 5
- [61] Soubiran C, Allende Prieto C, Altmann M, et al. Proceedings of the annual meeting of the Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique (SF2A)-2008, Paris: the French Society of Astronomy and Astrophysics, 2008: 35

Current Progress on Second Astrometric Satellite (Gaia) Project

JIN Wen-jing

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

Abstract: The scientific goals of the second astrometric satellite (Gaia) are briefly described. Gaia will be launched in March 2013. The current progress of this project is presented in this paper, especially the basic principle of observational data processing method is given. The difference between Gaia and Hipparcos data processing is also pointed out. In order to attain the accuracy with micro-arcsecond in proper motion some systematic errors such as secular aberration drift, effects of the low-frequency gravitational wave, the Universe expansion anisotropy, the weak microlensing and the microlensing noise should be considered. The construction of Gaia optical reference frame, including the selection of quasars and the attainable accuracy, is mentioned. As for the link between Gaia reference and the radio reference frame ICRF-2, which is adopted by IAU at the 27 th IAU general assembly, the core drift and detection of luminosity in long-term as accident errors should be considered. Finally, through the collaboration with some countries some research subjects, which can be carried out on ground based observations with current instruments and 65 m radio telescope to be built at Shanghai Astronomical Observatory in China, are suggested to support Gaia observations.

Key words: Gaia reference frame; proper motions; gravitational waves; microlensing