

第十届海峡两岸天文望远镜与观测前沿技术研讨会

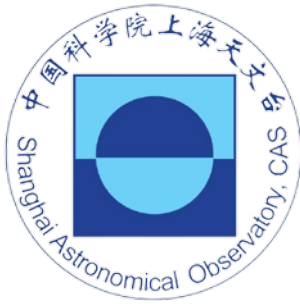
新型光学三指向望远镜及其潜在应用

齐朝祥

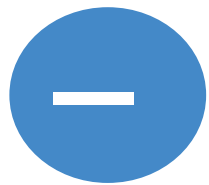
中国科学院上海天文台

2023/11/21

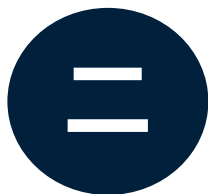
台北



汇报提纲



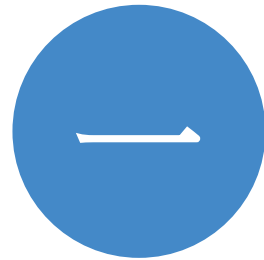
天体测量的本质



相对与绝对天体测量的原理



新型三指向望远镜及潜在应用



天体测量的本质

地球

太阳系

太阳的星际邻居

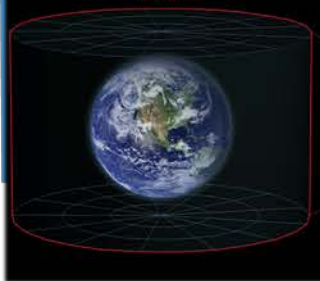
银河系

本星系群

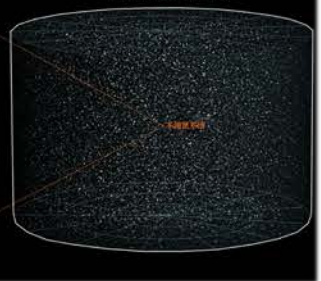
室女座超星系团

本超星系团

可观测宇宙



测量天体位置运动信息是推动人类解密宇宙的核心源动力



石申
(公元前370~270?)



依巴谷
(公元前190-125)



托勒密
(公元90~168)



哥白尼
(公元1473~1543)



第谷
(公元1546~1601)



开普勒
(公元1571年~1630)



伽利略
(公元1564~1641)



牛顿
(公元1643~1727)



爱因斯坦
(公元1879~1955)



勒维特
(公元1868~1921)



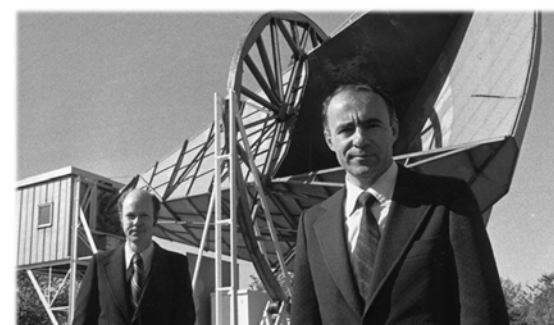
沙普利
(公元1885~1972)



哈勃
(公元1889~1953)



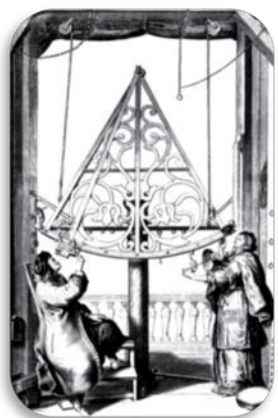
伽莫夫
(公元1904~1968)



威尔逊 (1936年~)
彭基亚斯 (1933年~)

天体测量本质

用本地的尺和钟，测量来自遥远天体电磁波信号的方向，反演天体三维位置、速度，探寻天体运动学规律，不断解密宇宙大小、结构、质量、演化等科学奥秘，并为人类定位导航定时（PNT）服务。



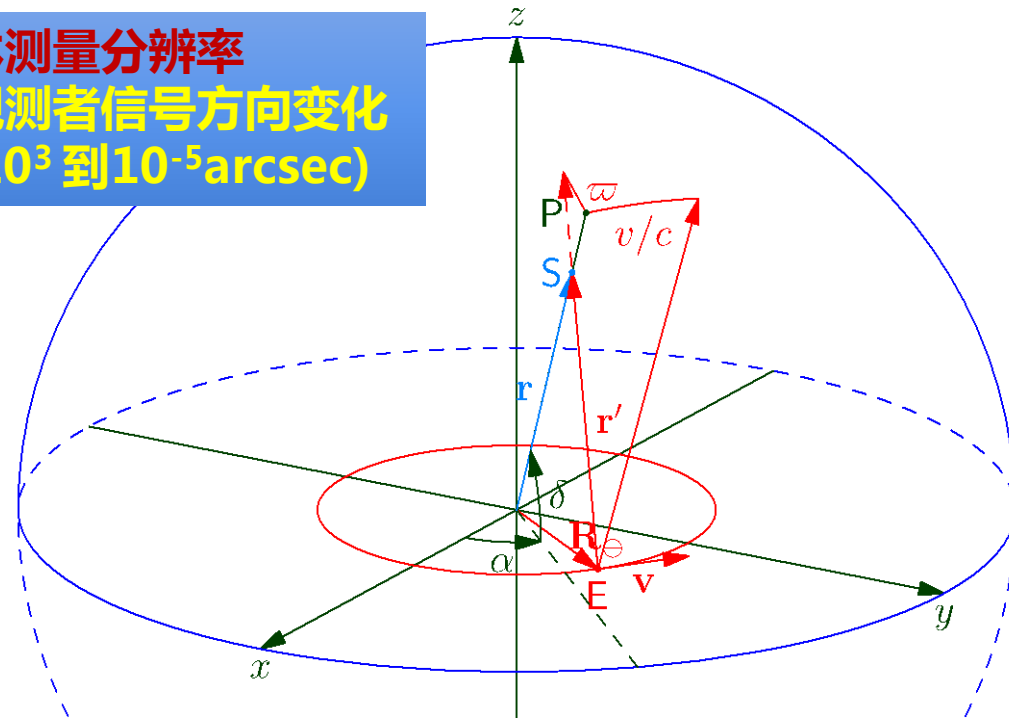
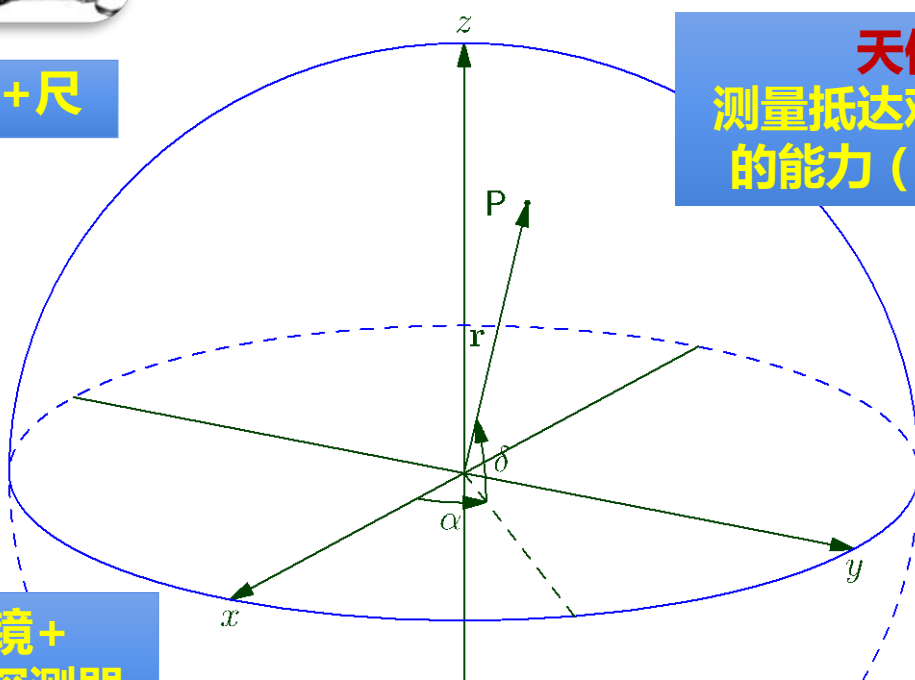
方向及其变化 → 视差距离、切向自行速度、开普勒轨道（天体质量）、引力偏折效应（引力波、引力透镜、暗物质等）

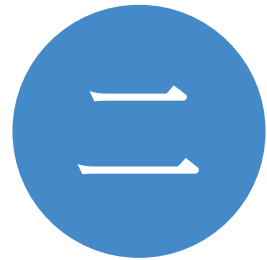
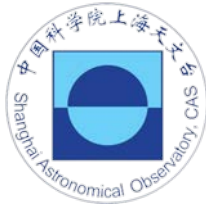
古代至1609年：目视+尺



1609年至今：望远镜+码盘+照相底片+光电探测器

天体测量分辨率
测量抵达观测者信号方向变化的能力（ 10^3 到 10^{-5} arcsec）

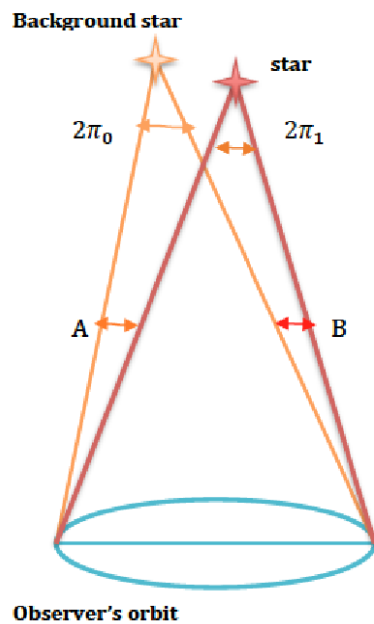
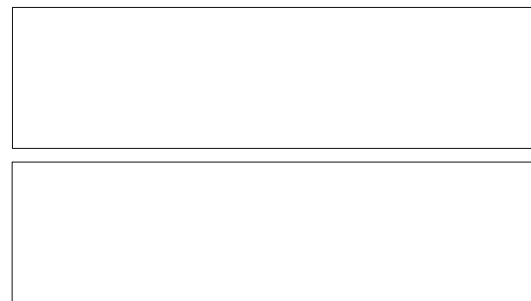
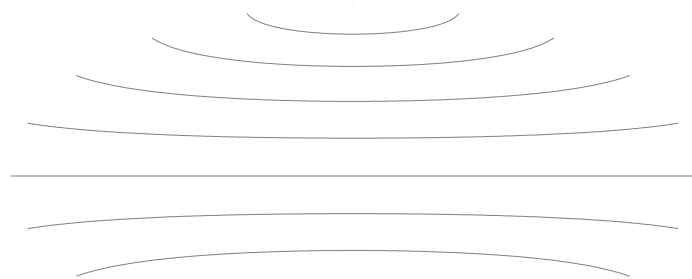
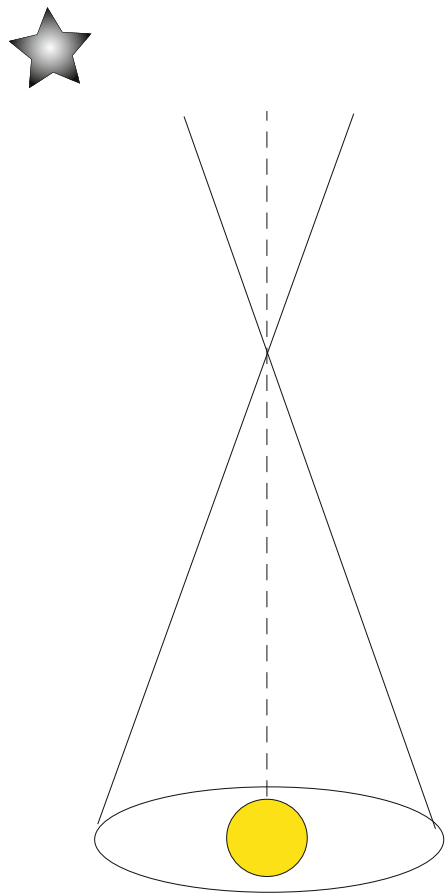




相对与绝对天体测量的原理

相对天体测量原理

相对天体测量依赖于参考天体的准确性、稳定性和可见性。下图以天体三角视差距离为例，方向和自行的测量也存在类似情况。1989年前，天体测量多是相对天体测量。



$$\Delta(X_r - X_b)_{T_0-T_1} = (\mu_r - \mu_b)\Delta t + P_r\pi_r - P_b\pi_b$$

$$\begin{aligned} \Delta(X_r - X_b) &\simeq \Delta\mu\Delta t + P_r(\pi_r - \pi_b) \\ &\simeq \Delta\mu\Delta t + P_r\Delta\pi \end{aligned}$$

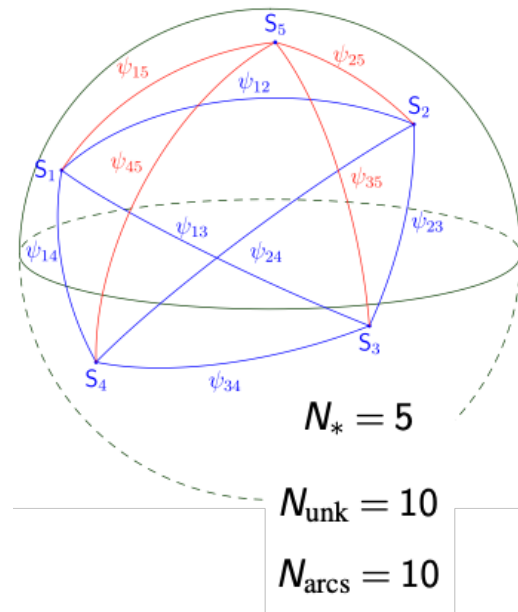
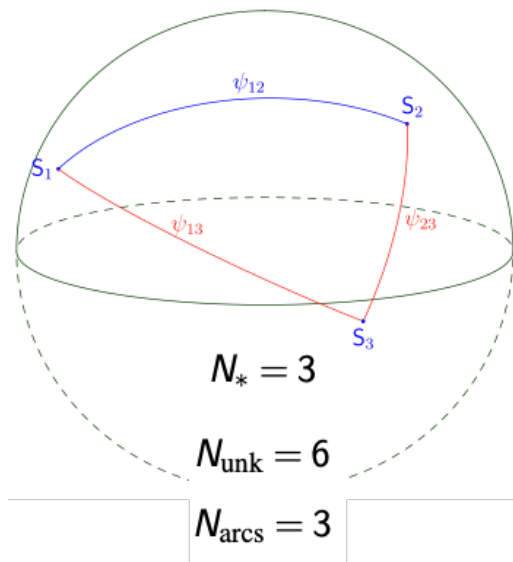
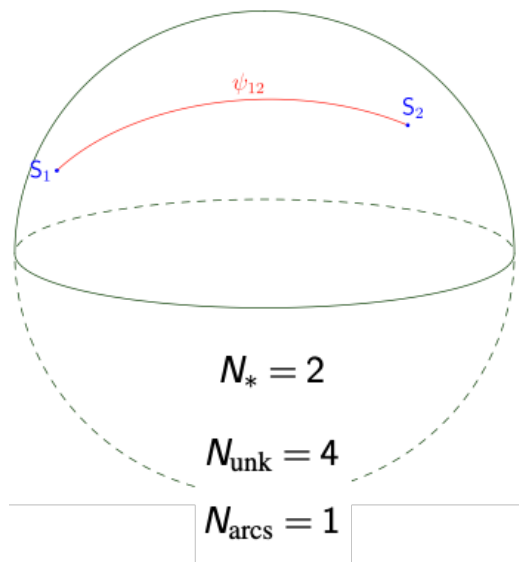
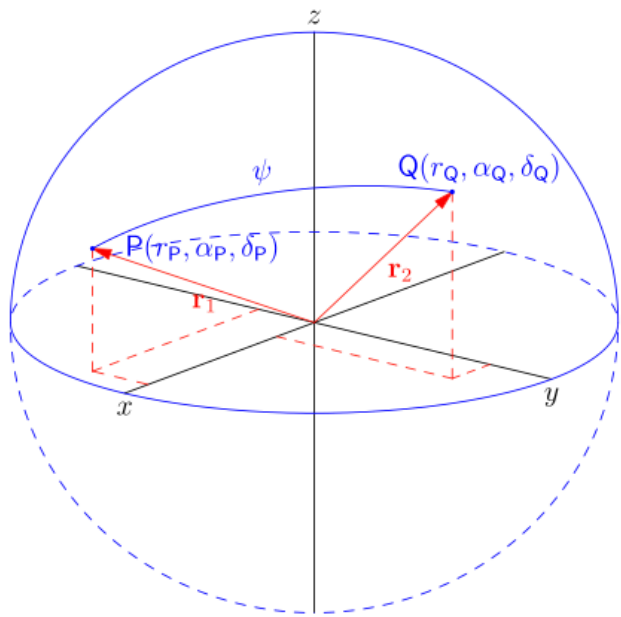
$$P_x = \cos(\alpha) \cos(\vartheta) \sin(\lambda_o) - \sin(\alpha) \cos(\lambda_o)$$

相对天体测量，视场内天体的视差因子P相近，只能解算出天体的相对视差值。

绝对天体测量原理

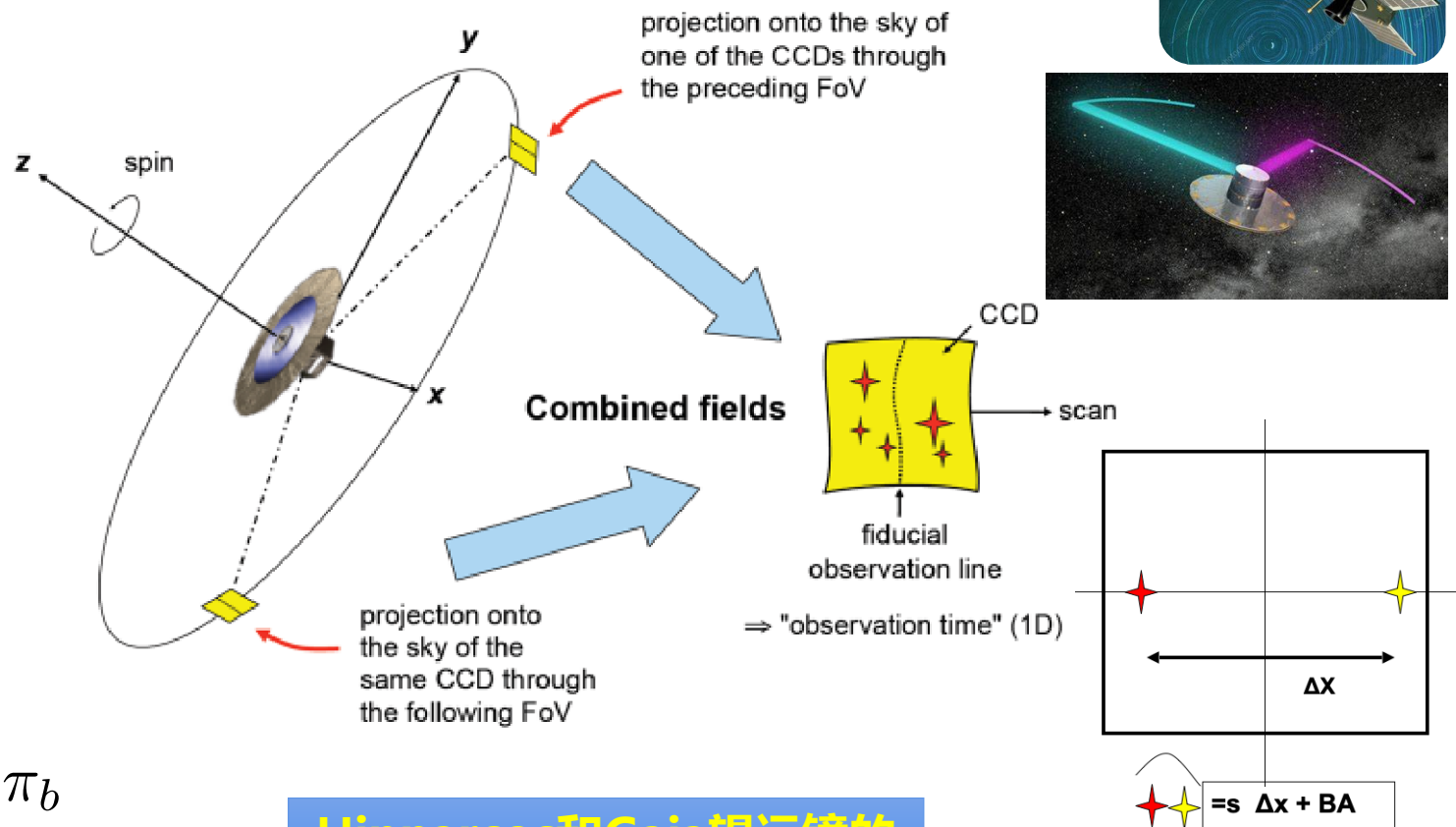
绝对天体测量不依赖任何已知参考基准，直接测量天体间弧长及其变化，独立解算待测天体的三维位置及其变化（方向、视差和自行）。

$$\cos \psi = \frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1| |\mathbf{r}_2|}$$



$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{r}(\alpha, \delta, \varpi) \\ &= \mathbf{r}(\alpha_0, \delta_0, \varpi, \mu_\alpha, \mu_\delta) \end{aligned}$$

绝对天体测量原理



$$\Delta(X_r - X_b) = \Delta\mu\Delta t + P_r\pi_r - P_b\pi_b$$

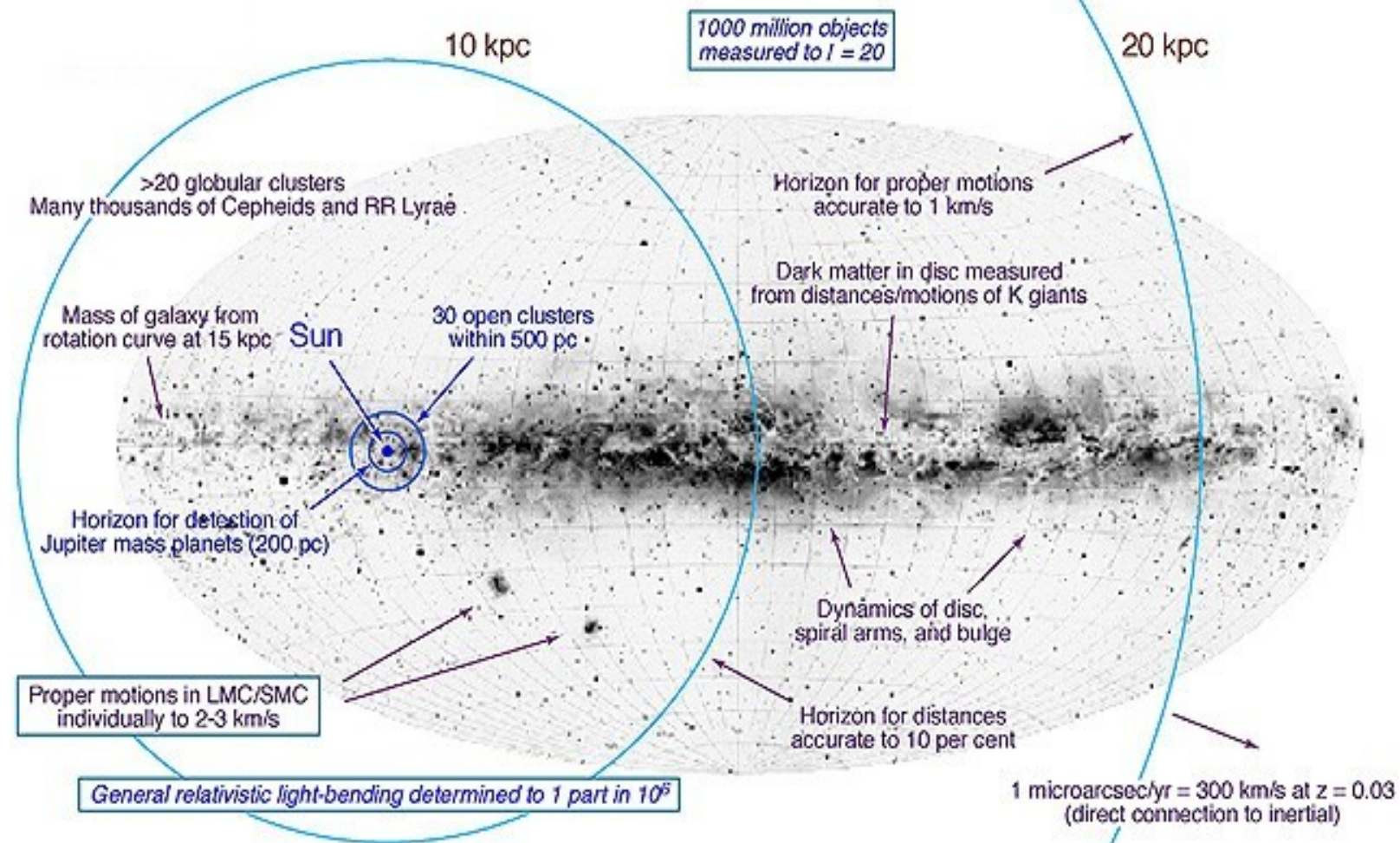
$$P_x = \cos(\alpha) \cos(\vartheta) \sin(\lambda_o) - \sin(\alpha) \cos(\lambda_o)$$

两个视场内天体的视差因子P差异大，可单独解算出每个天体的绝对视差值。

Hipparcos和Gaia望远镜的绝对天体测量原理示意图

绝对天体测量典范

Gaia将至少在太阳周围10 kpc内，以误差不大于10%的精度（10 μ as），测定银河系六维（位置和速度）运动，从而为恒星物理、暗物质探寻、宇宙演化提供实测信息。



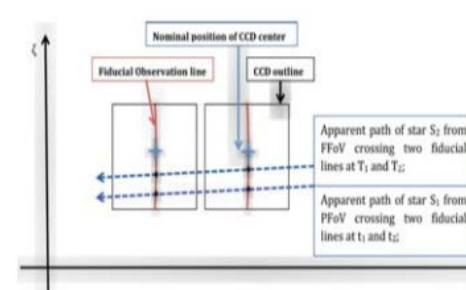
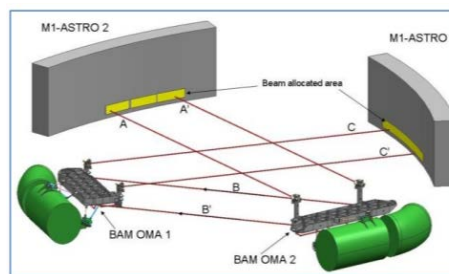
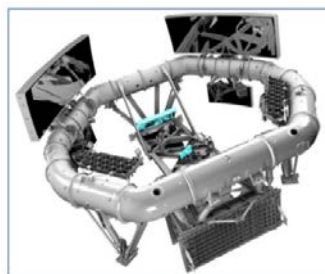
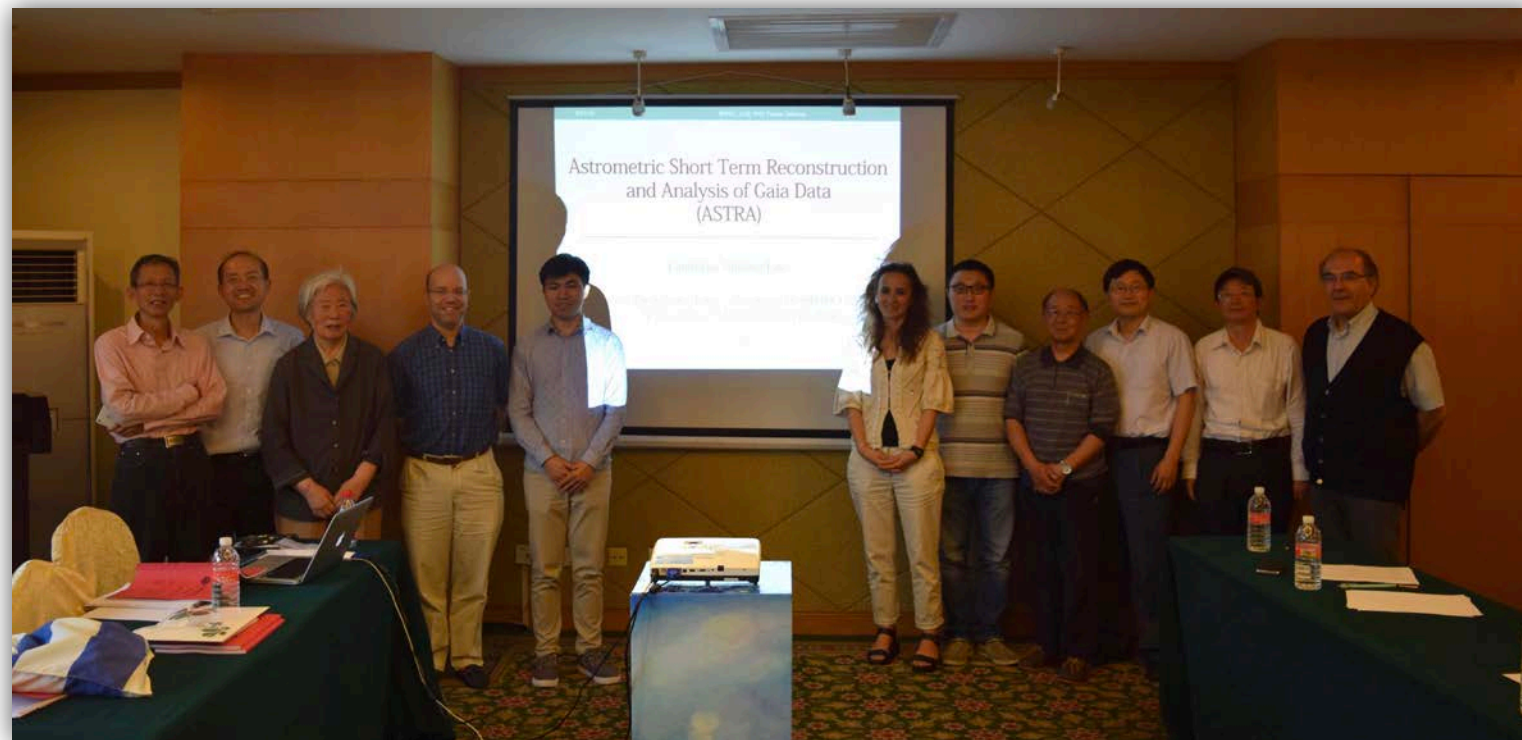
宇宙学的实验室--银河系

绝对天体测量典范



上海天文台正式参与了 欧空局Gaia项目

1. 单星天测5参数解算；
2. 双星轨道解算；
3. 类星体识别与天球参考架评估；
4. 望远镜基本角变化第三方独立检测。



We treated a full day (17 Oct 2016) of Gaia astrometric data, recover a value for the **6-h oscillation of 1.356 ± 0.857 mas**, this is consistent with the BAM finding for that day.

B. T. Prusti, ed.

doi:10.1017/S1743921317006007

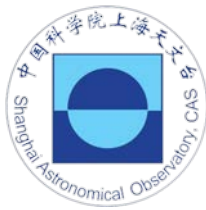
On-sky verification of the 6-h periodic basic angle variations of the Gaia satellite

Shilong Liao^{1,2,*}, Mario G. Lattanzi², Alberto Vecchiato², Zhaoxiang Qi¹, Mariateresa Crosta² and Zhenghong Tang¹

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, 200030 Shanghai, China

*email: shilongliao@shao.ac.cn

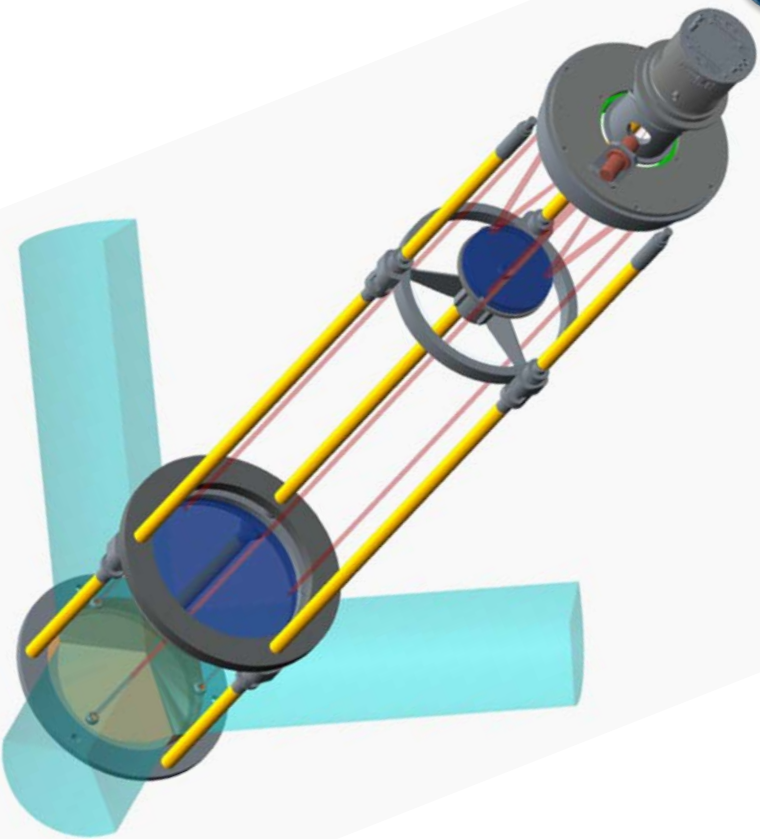
²INAF-Osservatorio Astrofisico di Torino, Strada Osservatorio 20, I-10025 Pino Torinese, TO, Italy



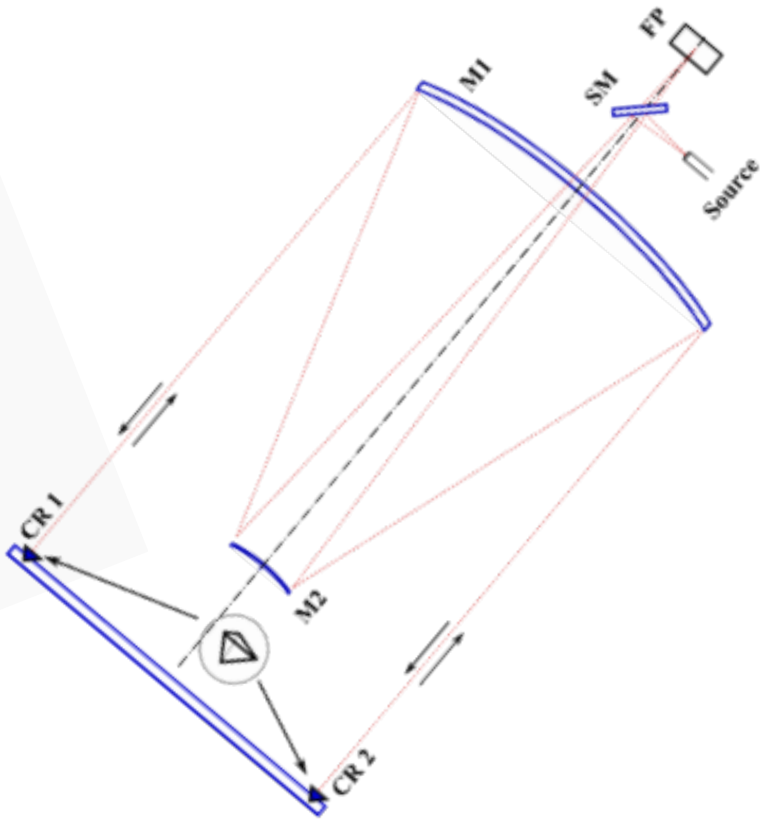
新型三指向望远镜及潜在应用

新型三指向望远镜

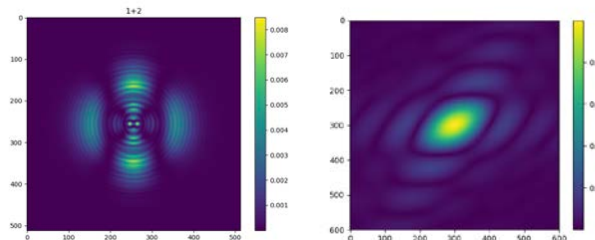
2013年，上海天文台齐朝祥、赵铭、于涌等人，提出了三指向望远镜的创新想法，可单次测量3个相互垂直的方向量，期望能在测地、测月、测天等方面能有所创新应用。



望远镜光机概念示意图



激光干涉基本角监测系统



激光衍射条纹与星像

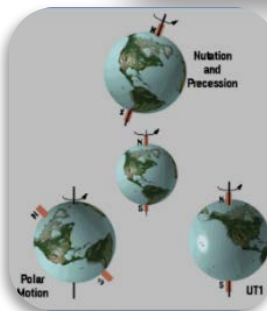
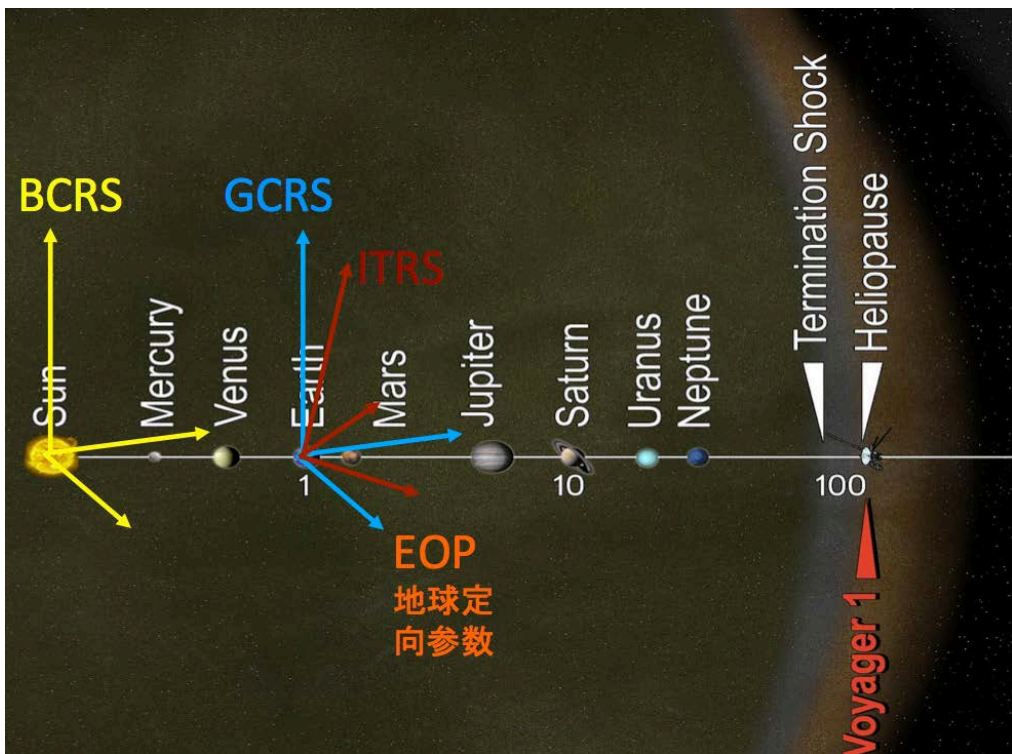
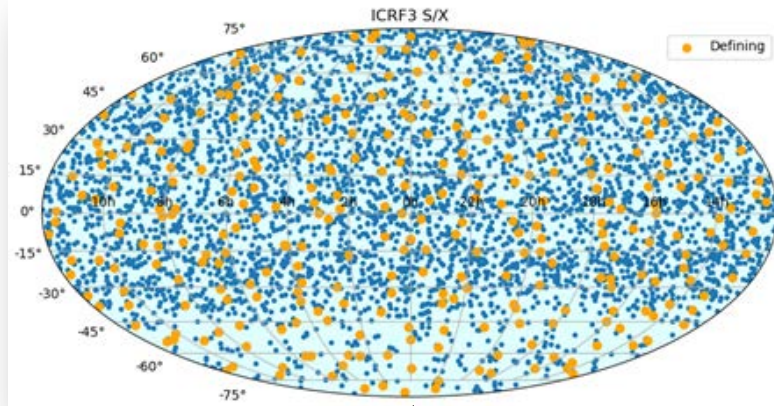


全反射棱镜

新型三指向望远镜

测量地球定向参数 EOP

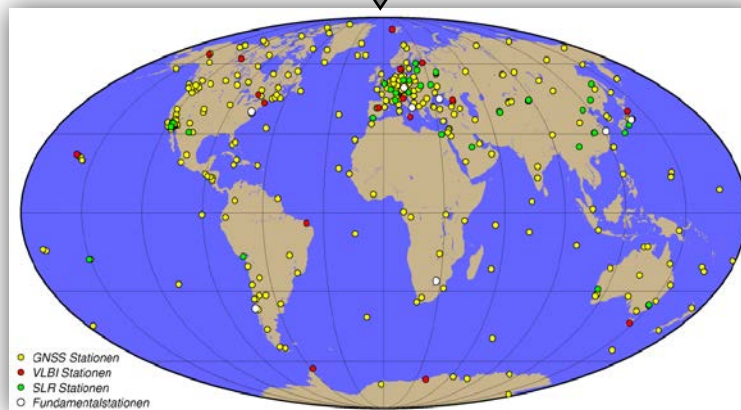
天球参考系(ICRS)



地球定向参数 (EOP)

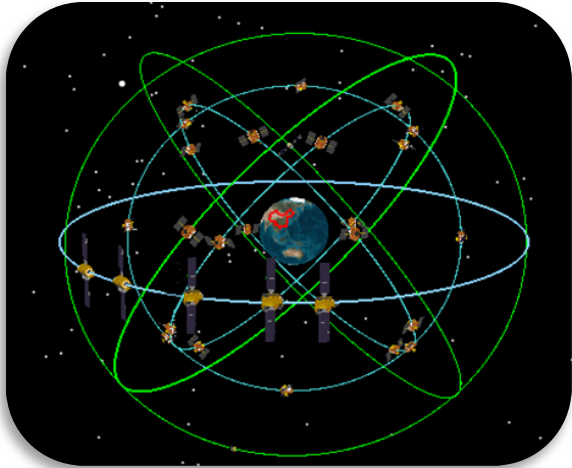


测量EOP，历史上主要以地面广域部署天顶筒或中星仪（至少3个测站）测量恒星为主；1990年后以地面组网VLBI望远镜测量类星体为主。



地球参考系(ITRS)

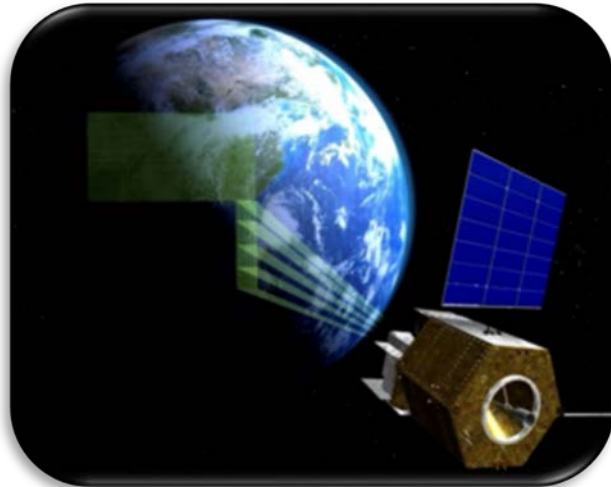
EOP可实现地球参考架与天球参考架互联，用户广泛，地球变化莫测，须不断实测。



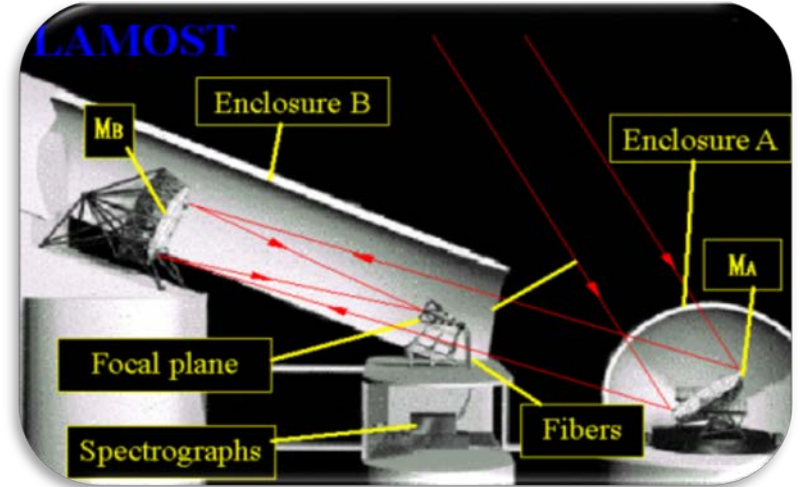
卫星定轨导航



深空探测定位

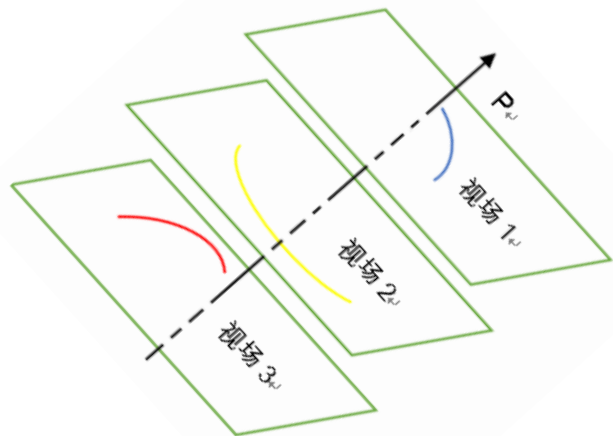
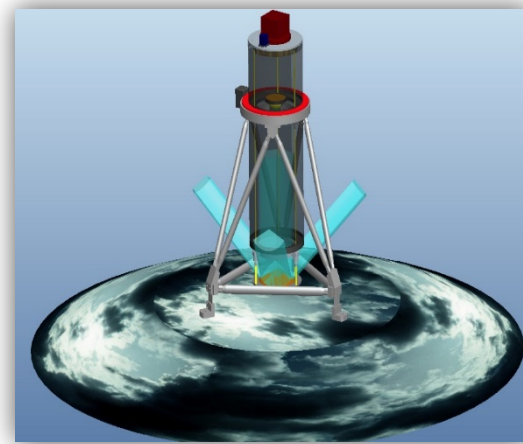


遥感测绘指向匹配

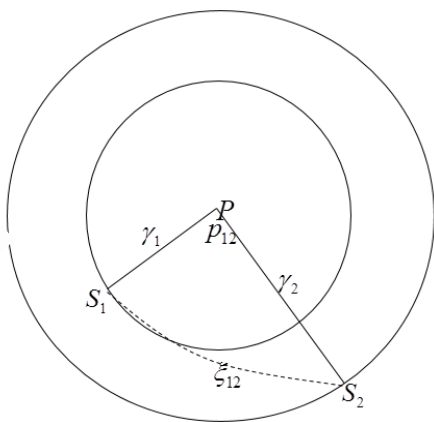


地基望远镜精准指向

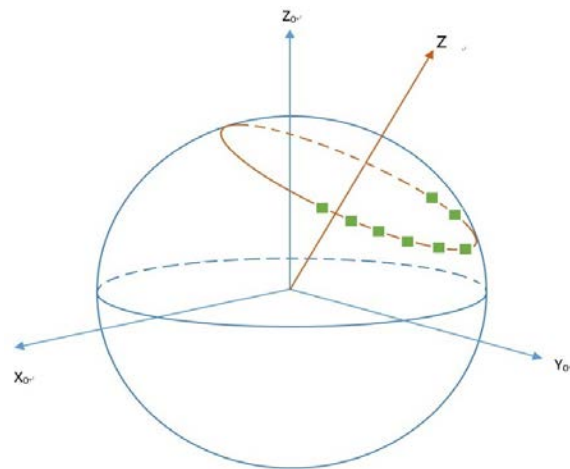
随着地球空间姿态的变化，望远镜不断为星空拍照，经过图像处理可获得三个反射光轴在星空背景上的轨迹。轨迹中心在地心天球坐标系GCRS中的位移体现了地球自转轴CIP的空间运动即岁差和章动，轨迹半径的变化体现了地球自转轴的本体运动即极移，轨迹弧长体现了地球自转角ERA。



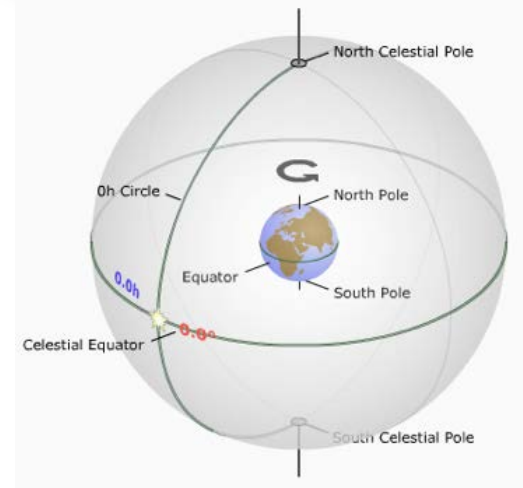
岁差章动



极移

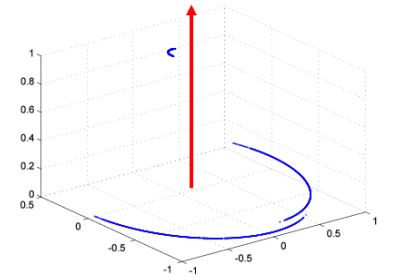


自转 (UT1)



新型三指向望远镜

三指向望远镜 测量EOP



2014年的简易样机



2018年的原理样机

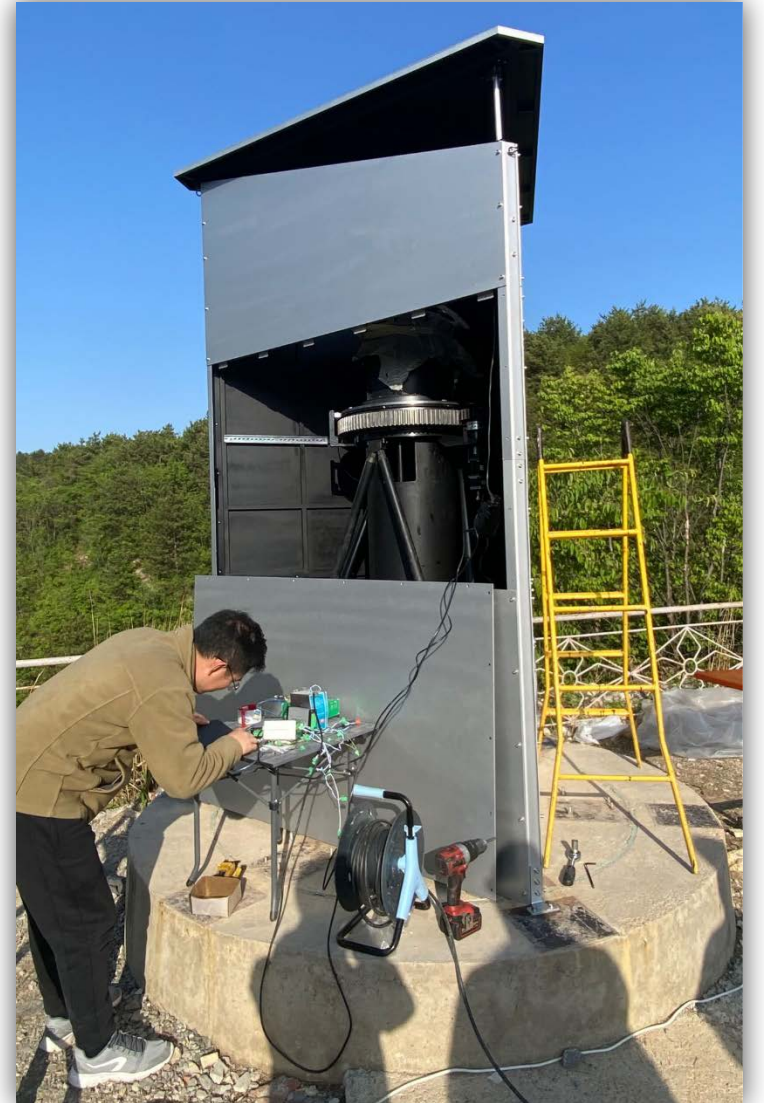
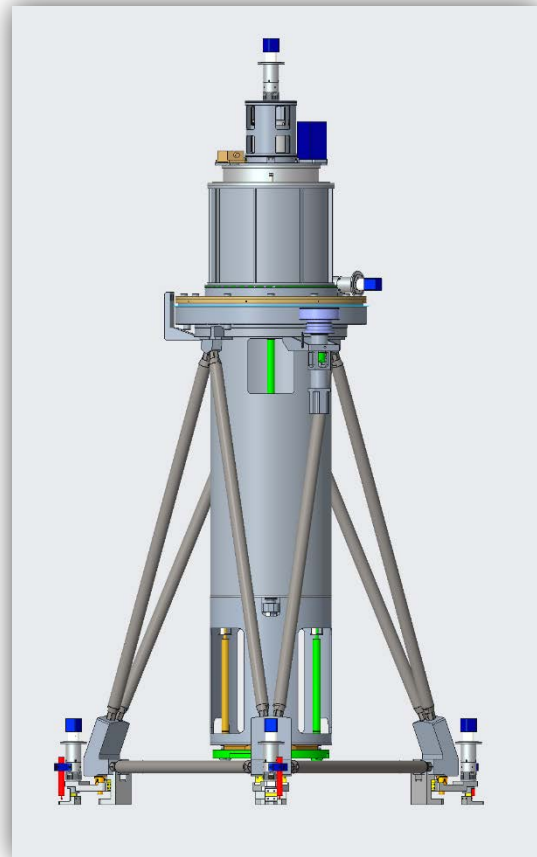
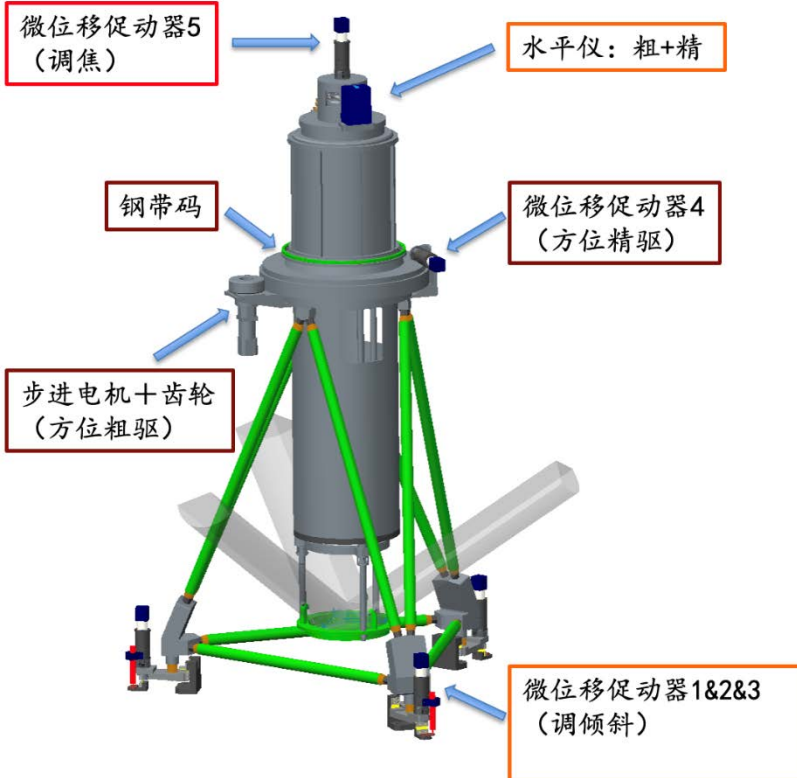


2018年的实测图像，结果验证原理可行

历元	解算精度 (角秒)
20180425	0.64
20180419	0.13
20180418	0.14
20180414	0.12
20180413	0.21
20180412	0.30
20180411	0.29
20180401	0.28
20180331	0.40
20180328	0.32
20180327	0.32
20180326	0.37
平均	0.27

新型三指向望远镜

三指向望远镜 测量EOP



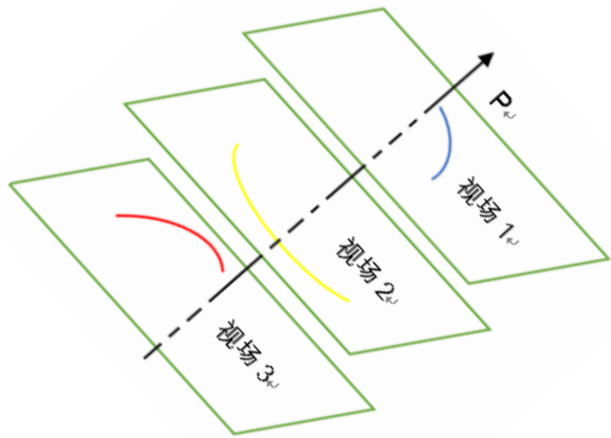
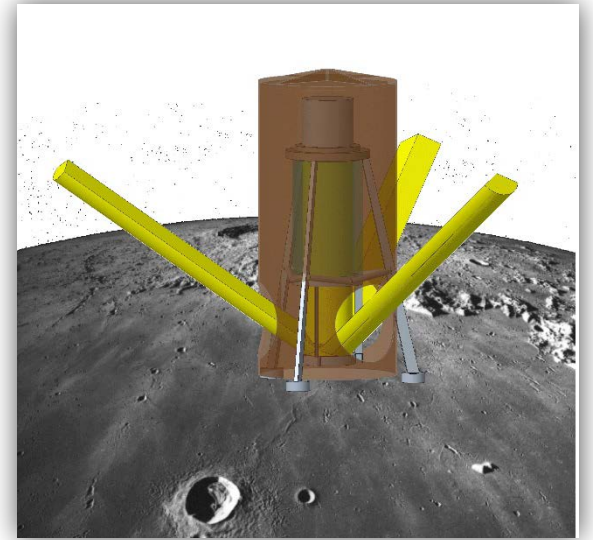
2020年提升精度措施
角秒级监测望远镜指向变化

2020年的原理样机
设计图

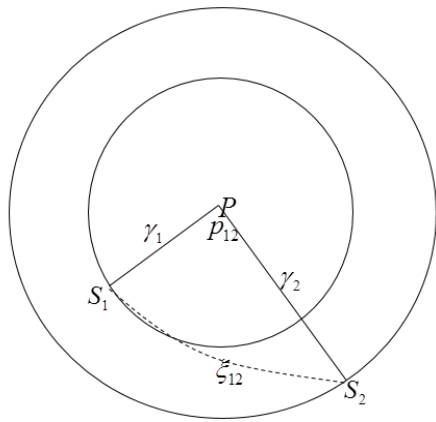
2023年已部署到兴隆观测基墩
2024年开始观测实验

测量月球天平动的基本原理

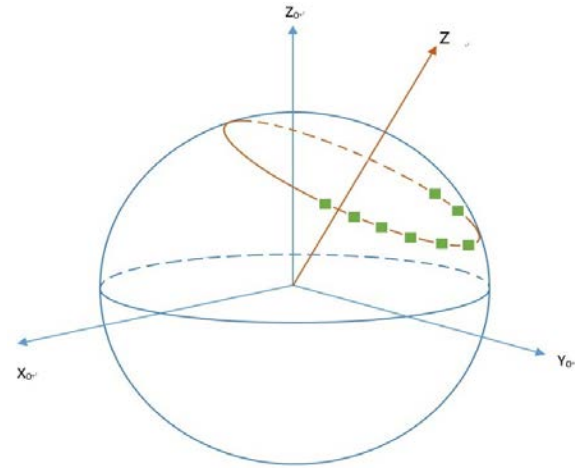
随着月球空间姿态（天平动）的变化，3指向望远镜不断为星空拍照，可获得三个反射光轴在星空背景上的轨迹。轨迹中心在月心天球坐标系中的位移体现了月球自转轴的空间运动即月球岁差章动，轨迹半径的变化体现自转轴在月球本体的运动即月球极移，弧长变化体现了月球自转角。可在月球上直接测量月球姿态变化，直接、全面（规避激光测月难以测定月球绕地月连线方向旋转角的不足）。



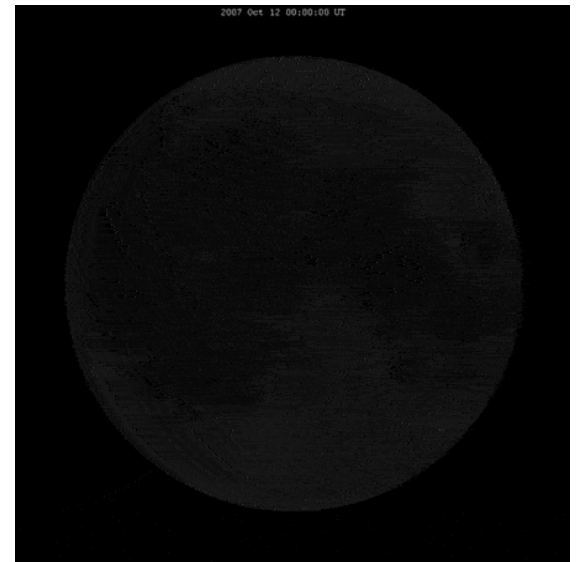
岁差章动



极移



自转



新型三指向望远镜

测量月球天平动

1. 测量月球天平动可以实现“由表及里”测定月球内部整体特性；
2. 在月球上的使用仍是空白，可实现首次月面直接测定月球动力学规律；
3. 基于照相天体测量技术，载荷小，绝对精度高。



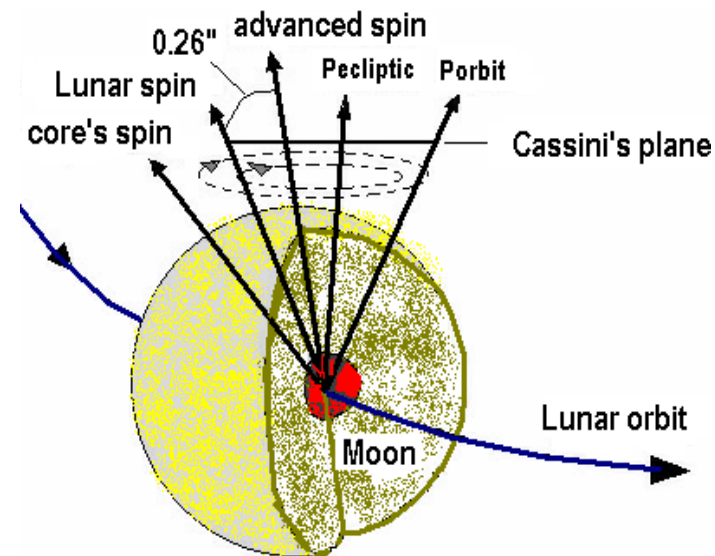
月球至今仍多迷



关闭状态



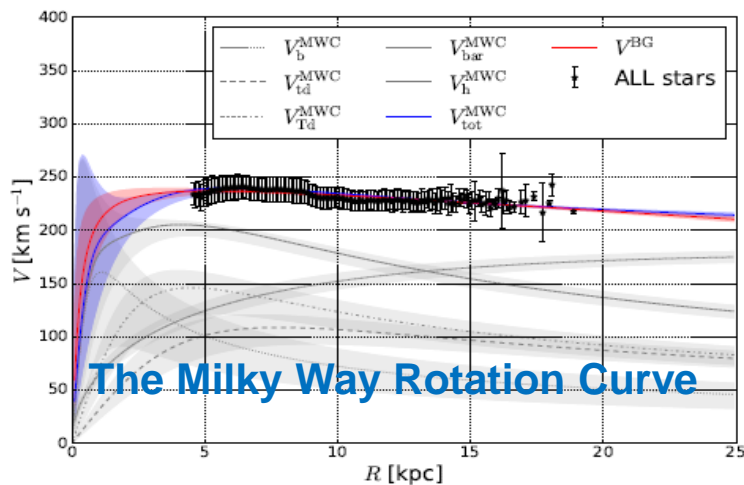
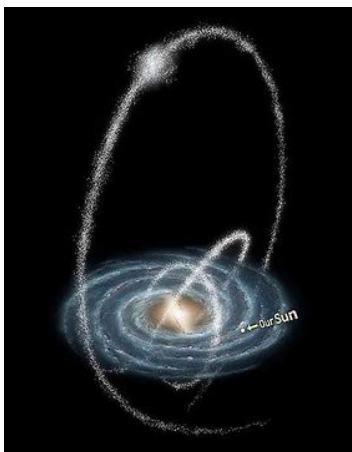
太阳能电池板展开观测状态



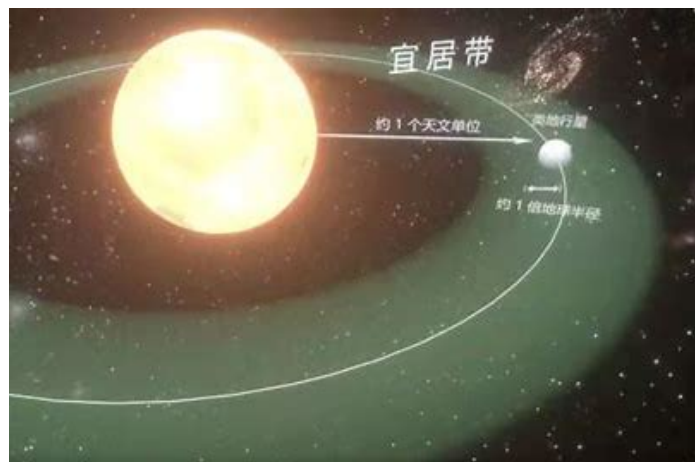
由运动学反演动力学

潜在的“大科学”

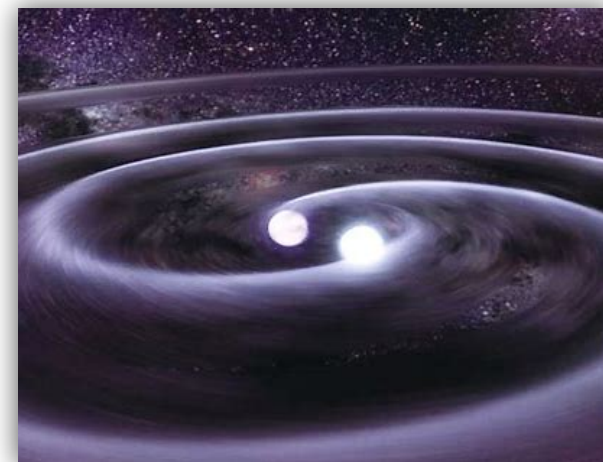
1. 找暗物质：0.1uas精度绝对测量视差和自行，范围到银河系边缘乃至M31；
2. 找系外行星：太阳系外（10PC范围内）类地行星的探测；
3. 找引力波：引力波强度和方向的精准测量。



探测暗物质



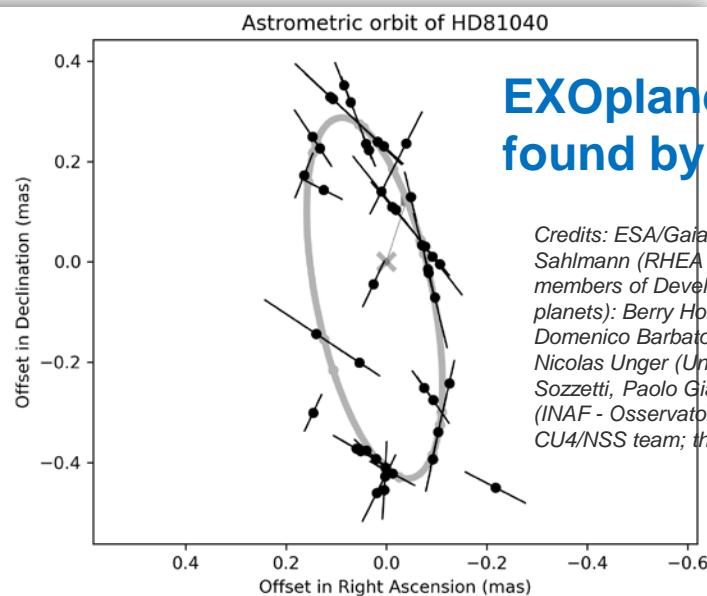
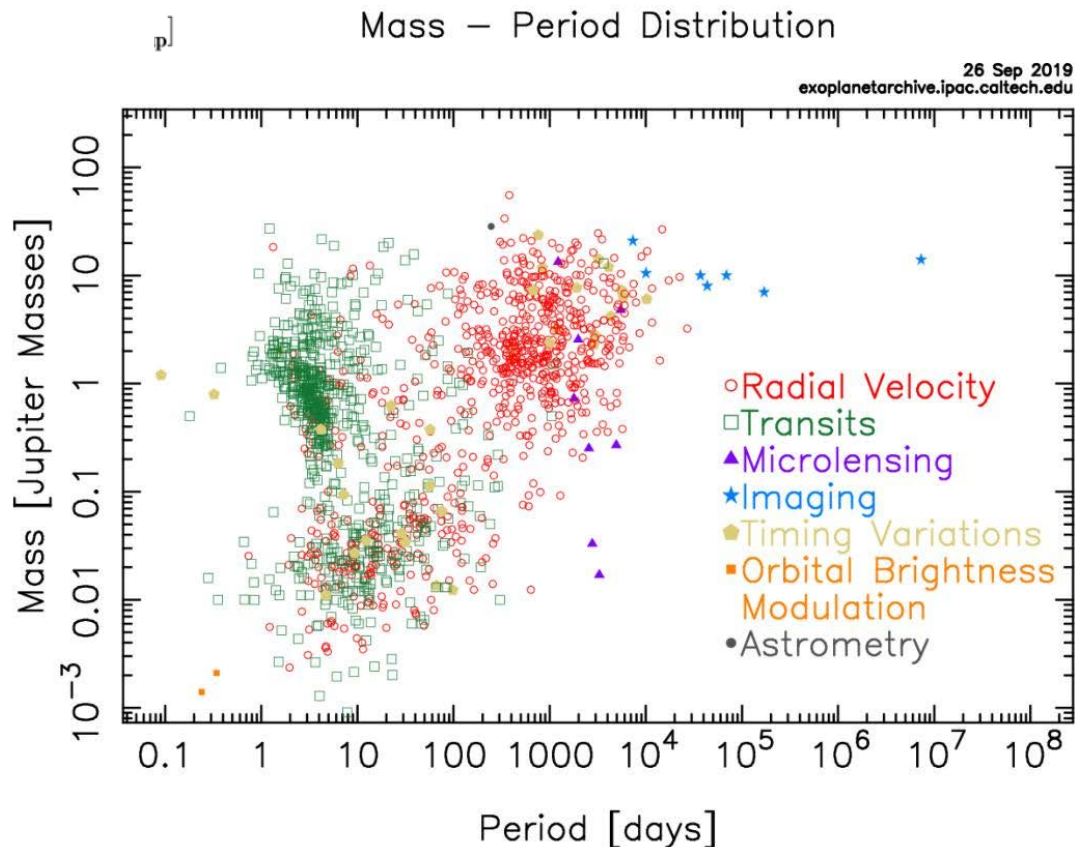
探测系外行星



探测引力波

太阳系外（10PC范围内）类地行星的探测

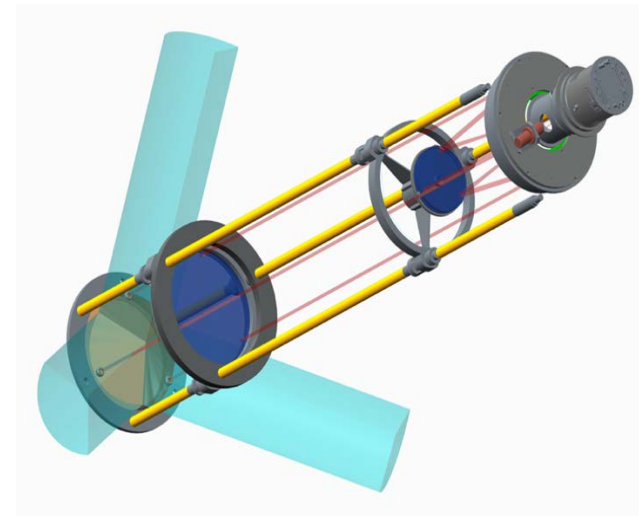
目前，多数系外行星由掩星法和视向运动法实现，无法解耦行星轨道倾角 $\sin(i)$ 和行星质量 M ，只能给出行星的最小质量 $M \sin(i)$, $i=90^\circ$ 。天体测量是解决此问题关键。



EXOplanets
found by Gaia

Credits: ESA/Gaia/DPAC/CU4-CU3, Johannes Sahlmann (RHEA Group for ESA, ESAC); members of Development Unit 437 (Extrasolar planets): Berry Holl, Damien Ségransan, Domenico Barbato, Jean-Baptiste Deslisle, Nicolas Unger (University of Geneva), Alessandro Sozzetti, Paolo Giacobbe, Mario G. Lattanzi (INAF - Osservatorio Astrofisico di Torino); the CU4/NSS team; the CU3 teams.

敬请指导



齐朝祥

zxqi@shao.ac.cn

中国科学院上海天文台

2023年11月21日@台北

