

2022年度邵逸夫奖之 空间天体测量

邓劲松

(中国科学院国家天文台 100101)

1. 邵逸夫奖天文学桂冠得主

2022年5月24日,单项奖金金额高达120万美元的邵逸夫奖公布,其中天文学奖被欧洲天文学家伦纳特·林德格伦(Lennart Lindegren)和迈克尔·佩里曼(Michael Perryman)平分,“以表彰他们一生对天体测量学的贡献”,特别是在欧洲空间局“依巴谷号及盖亚号的构想和设计中扮演的角色”。



图1 邵逸夫天文学奖获得者伦纳特·林德格伦(右)和迈克尔·佩里曼(左)(图片来源:邵逸夫奖官网)

两位天文学家均为20世纪50年代初生人,获奖身份分别是瑞典隆德大学天文与理论物理系隆德天文台的荣誉退休教授和爱尔兰都柏林大学学院物理学院的客座教授。林德格伦一直就职于隆德大学直至退休,是瑞典皇家科学院院士,而佩里曼则曾加入欧洲空间局为之直接服务多年。他们

二人是硕果累累的依巴谷天文卫星(Hipparcos)和盖亚天体测量探测器(Gaia)任务最主要的推动者及核心科学成员。

2. 天体测量学过往的兴衰

众所周知,天文学是一门以观测为主的学科。想必很多非天文专业人士会有疑问,用现代天文仪器对天体开展的各种定量化观测不就是测量吗?难道这里的天体测量还有何特定所指?

翻阅全国科学技术名词审定委员会公布的《天文学名词》(1998年版),能找到天体测量学的词条释义,即“天文学的分支,主要内容是测定和研究天体及地面点的位置和运动”;而互联网上的英文维基百科强调天体测量是对天体位置和运动的“精确”测量。至于前者释义中的“地面点”,是为了涵盖国内天体测量在当代占据重要地位的大地测量应用,本篇小文并不涉及。

显然,身为天文学最古老的一个分支,天体测量学是古代天文学的中心,也是现代天文学的基础。没有天体测量学,就不会有我们所需要的星图和星表。没有天体测量学,也不会有开普勒三定律的历史性发现,物理学的发展和人类对世界的认识不知会走上怎样一条歧路。而伴随着望远镜等一系列先进仪器和奇思妙想的专用技术的发展,现代天体测量学得以诞生并逐渐成熟,位置(包括距离)和运动测量的天体数目和精度在过去两百年间实现了巨大的提升。

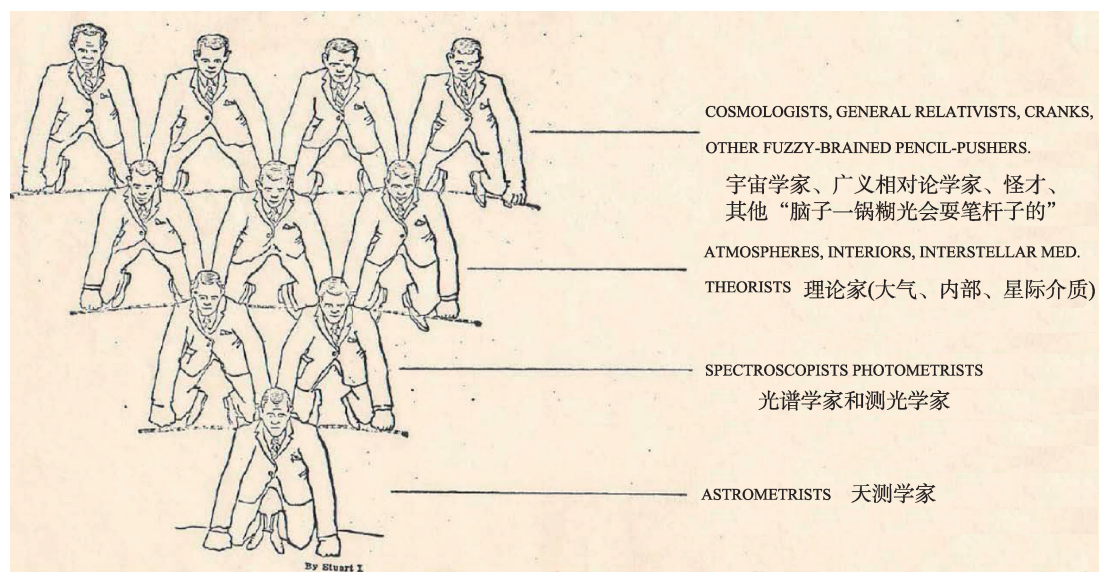


图2 20世纪后期天测学家眼中的天文学倒金字塔(图片来源:Ronald Probst)

但是,到了20世纪六七十年代,天体测量在国际上逐渐边缘化,沦落为一个只有少数人从事的琐碎乏味、费时费力的“技术工种”。在大部分天文学青年才俊的眼中,看不出它还能对揭示宇宙奥秘做出什么令人激动的贡献,有何值得投身的吸引力。天测专用的子午望远镜被大量关停,腾出空间用于扩建天文台的图书馆、办公室甚至食堂。1974年,美国弗吉尼亚大学的罗纳德·普罗布斯特(Ronald Probst)在硕士论文中发布了一张漫画——天文学的倒金字塔压在形单影只的天体测量学家身上。漫画流传于国际天体测量界,表达着他们当年的无奈和困惑。

3. 天测的地面之困与转机——走向空间

天体测量学当年的困境,很大程度上是因为它已发展到了接近地面观测条件所允许的能力极限。首先,地基光学天文观测难以避开大气视宁度问题,即大气湍动造成的星像模糊(以及快速晃动)。对天体测量来说,还必须改正大气折射现象带来的位置畸变,这个量取决于测量时刻的天体地平高度和当地大气实况,并且因为大气折射率的波

长依赖关系,跟天体自身的颜色和仪器的波长响应也有耦合。此外,地球重力导致的望远镜弯沉,温差变化导致的热胀冷缩,都是不可忽视的误差来源。而考虑到地面上单台仪器所能覆盖的天区有限,要获得全局意义上的天体绝对位置测量,必须将多台仪器的不同观测数据缝合在一起,它们之间的未知系统偏差将会在全天范围内积累,难以消除。事实上,到20世纪70年代,(光学波段)绝对位置测量所能实现的最好精度停滞在0.1角秒附近,且仅限于几千颗最亮的恒星。

20世纪60年代中期,资深的法国天文学家皮埃尔·拉克鲁特(Pierre Lacroute)率先提议在空间开展天体测量。他有一个天才般的创意:把方向相距很远的两块天区同时成像在望远镜焦面的同一区域,将二者固定已知的间隔角度作为基准,于是可以将二者的恒星两两成对、做天球上投影位置的较差测量,再通过改变天区对来扫描全天、并实现多次覆盖;这样,就能把天球各处的恒星位置严密耦合在一起,实现全局自洽、高精度的绝对测量。而要想实现这一方案,必须摆脱地球大气层对观测的限制。

当代天体测量学还格外关注三角视差法对银河系恒星距离的测量,因为距离是将张角、辐射流

量等观测量转换为天体的物理尺寸、发光强度、质量等内禀特性的关键信息,而视差距离是逐级深入的所谓“宇宙距离阶梯”的根基。视差,是指从两个不同位置观测同一物体,视方向相对于远处背景物体的差异。我们的深度视觉基于两眼间距,而与天文测距对应的是地球绕太阳公转带来的天体位置的周年视差,测量基线是地球轨道(见图3所示天球投影位置周年视运动)。周年视差1角秒所对应的距离,被定义为天文学的基本距离单位秒差距,约等于3.26光年。

同一视场内的天体方位基本一致,视差测量中的方位相关因子可视为相同,一般只能获得待测天体与背景天体间的视差相对值,这限制着地面的距离测量精度。而采用拉克鲁特的空间天测方案,可同时解算出待测天体和背景天体的绝对视差,这是因为它们来自方位间隔甚远的天区对,视差因子迥异(参见图3)。

在欧洲天体测量学界如法国的让·科瓦列夫斯基(Jean Kovalevsky)和丹麦的埃里克·霍格(Erik Høg)等人的共同推动下,拉克鲁特的方案逐步变得完善

和技术可行,属于以林德格伦和佩里曼为代表的新一代天体测量学家的空间时代渐渐拉开了帷幕。

4. 依巴谷卫星与天测的凤凰涅槃

1980年,欧洲空间局终于批准研发专用于天体测量的伊巴谷天文卫星,英文全称是 High Precision Parallax Collecting Satellite(高精度视差采集卫星),采用缩写 Hipparcos 以纪念相传创立三角学、发明星等、制定西方世界第一份星表的古希腊天文学家喜帕恰斯(Hipparchus)。

年轻的佩里曼在同一年入职欧洲空间局。他刚拿到剑桥的理论物理博士学位,之前研究过射电星系,而上级指派他去了解关注依巴谷项目。身为天体测量的门外汉,他本非特别情愿,但很快就被其概念的简明巧妙和创造性迷住了。佩里曼自翌年起担任项目科学家,同时主持科学团队,任务是协调并获得科学界的支持来指导设计、研制、测试及运行,确保卫星能满足科学需求,并优化其科学能力。

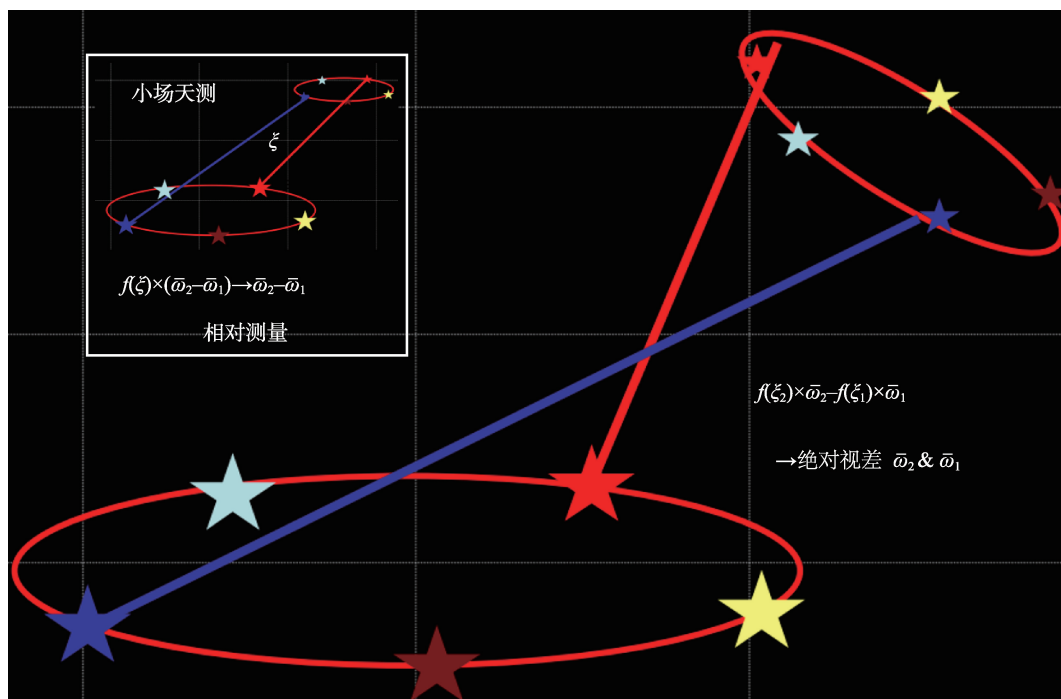


图3 小场天测的相对视差测量(小图)与拉克鲁特提议空间天测方案的绝对视差测量(图片来源: François Mignard)

如图4所示,依巴谷的望远镜(口径约30厘米)设计保留了拉克鲁特的原初创意,从中劈开一面反射镜,使两半错开固定角度(依巴谷的设计取29度),将来自两个不同方向天区(间隔58度)的光线导入共同的成像光路。卫星沿一条垂直观测方向的轴自转(周期约2小时),两个视场一前一后扫描天球上同一个大圆,而自转轴自身的方向进动(周期约57天)带动扫描大圆遍历全天——任务最终对天球各个方向实现了平均约30次观测。星像沿扫描方向被焦面格栅调制,位置信息被以探测时间信号的形式记录下来。

身为霍格的学生,林德格伦比佩里曼早几年进入依巴谷项目。霍格曾欣然赞同朋友的揶揄,说他对天体测量学的最大贡献莫过于发现了林德格伦。依巴谷的数据处理是一大难题,用全部数据直接全局求解远超出当年的计算能力。而林德格伦快刀斩乱麻,即刻找出一条让人恍然大悟的捷径,技术上可行而又足够严格。数据处理被分成三步,首先是估算扫描大圆上各对恒星的间隔,然后对大圆上的恒星位置一维求解,最后结合所有大圆解计算出恒星的天测参数。作为依巴谷项目的核心成员,林德格伦自1990年起接替霍格领导两个独立的数据处理团队之一。他为人低调,却满脑子的神机

妙算,同时又追求数学严谨,对依巴谷卫星的方方面面都有突出贡献。譬如,根据他别出心裁的建议,制造合束镜时先将两半镜面切掉一小条,就此“神奇地”提高了成像质量。

1989年8月8日,依巴谷卫星发射,目的地是高度约3万6千公里的地球同步轨道。卫星先进入一个近地点只有500公里而远地点与前者相衔接的转移轨道,但是意外发生了,远地点发动机点火失败,卫星被滞留在转移轨道上,任务可能功亏一篑!在工程团队心力交瘁之时,佩里曼临危自荐,接过来对工程负责的项目经理一职……经过数月马不停蹄的调整和测试,卫星在转移轨道上艰难开始扫描观测。尽管存在种种不利条件,头六个月全天观测数据的位置精度达到了约0.01角秒,已远超地面光学天测,依巴谷涅槃重生!

依巴谷卫星一直工作到1993年,最终获得的天测结果甚至超过了任务目标。它产生的依巴谷星表包含全天约12万颗亮星,测光精度约千分之二个星等,绝对位置精度优于1毫角秒,而其约1毫角秒的视差测量精度,对2万余颗近邻亮星而言,意味着距离的不确定度优于10%。国际天球参考系在光学波段的标准实现,就是基于依巴谷星表。霍格又首先注意到,测量卫星姿态的焦面设备也可以提取

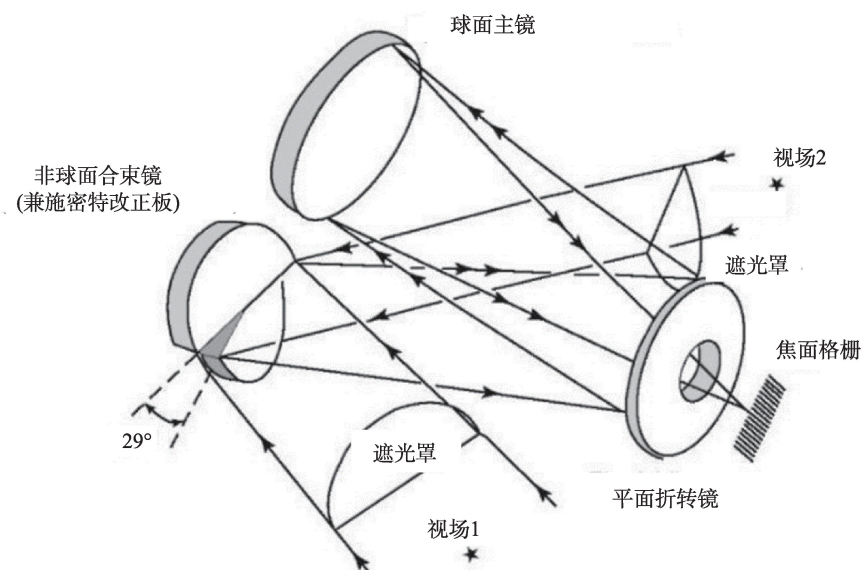


图4 依巴谷卫星的望远镜光学设计示意图(图片来源:Floor Van Leeuwen)

天体位置和星等信息,由此获得上百万颗恒星的第谷星表,精度介于依巴谷星表和地面天测之间,构成天文学家实用的“基本”参考架。

依巴谷的天测数据还直接产生了大量的天体物理学成果。人们得以了解银河系大尺度内的运动学和动力学,基于日地对星光的引力偏折验证了广义相对论,用视差距离更准确地定标造父变星“标准烛光”、从而协助哈勃空间望远镜确定了哈勃常数及宇宙的年龄,对年老球状星团的距离测量解决了其年龄与宇宙年龄冲突的长期悖论,等等。

5. 盖亚探测器——天体测量的全新时代

依巴谷只是空间天体测量的小试牛刀,由林德格伦和佩里曼牵头,欧洲天文界随即提议了雄心勃勃的盖亚项目,测量规模和精度要比依巴谷高几个数量级。项目最初称为 Global Astrometric Interferometer for Astrophysics,意为“(面向)天体物理学(的)全局天体测量干涉仪”。后来放弃了激进的干涉测量概念,回归依巴谷方案的设计原则,但英文缩写名 Gaia 得以保留,对应希腊神话生育天空和时间等远古众神的大地女神。

盖亚天体测量探测器成为欧洲空间局的旗舰型项目,于2014年发射,目前仍在轨工作。跟依巴谷卫星不同,它运行在环绕日地第二拉格朗日点的轨道上,此处位于日地连线的外侧,距离地球约150万公里,能摆脱地球对视野的遮蔽,稳定的热环境也利于最小化仪器热形变带来的测量误差。

盖亚由两台全同的三反消像散望远镜构成,经由合束器将不同方向的两个天区同时成像在共同焦面上(图5)。望远镜的主镜尺寸约 1.5×0.5 米,焦面由百余片 CCD 探测器拼接覆盖(见图5右下及小图),像元总数高达10亿。两个观测方向的夹角固定为 106.5° ,借助激光干涉测量将变化控制在微角秒量级。盖亚跟依巴谷一样通过自转(每秒一个角分)扫描天球大圆,天区依次扫过焦面上的星像

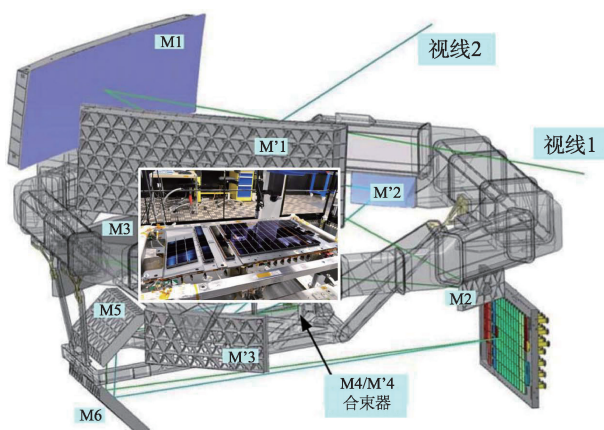


图5 盖亚天体测量探测器的望远镜及焦面示意图
(图片来源:欧洲空间局 Gaia 官网)

捕获区、位置天测区、星等测光区、视线速度区,而自转轴进动周期约2个月,任务期间计划对天球各方向实现平均约70次采样。

在盖亚任务中,佩里曼长期担任项目科学家并主持科学团队,直至2008年,而林德格伦则组织和领导了数据的处理和分析工作。

盖亚任务计划测量数十亿颗恒星(占银河系恒星总数约百分之一),外加一批河外天体,数据量极其庞大。不过,现今的计算能力也已远非依巴谷时代所能想象。因此,任务选取上亿颗恒星的数据做大规模整体迭代计算,获得包含天体测量参数、卫星姿态参数、仪器几何定标参数、(广义相对论效应的)参数化后牛顿修正在内的天测核心解。基于核心解,再推算出剩余大部分恒星的天测结果。随着观测数据的逐年积累和持续迭代,测量的规模和精度也不断提升,结果定期向翘首以盼的全球天文界发布。

盖亚最终版的测量结果将基于十年的观测数据,而截至目前发布的第三版,它已获得15亿颗恒星的完整天测参数,包含天球位置、周年视差和自行(天球上投影运动),测量出3千万颗恒星的视向速度,捕获到1千万颗河外的星系或类星体以及16万颗太阳系天体,还实现了太阳系近邻约100秒差距范围内30多万颗普通恒星的详尽编目。它对亮于15等恒星(比依巴谷星表暗大约10倍)的位置测

量精度达到了0.01~0.02毫角秒,而至于视差测量得到的距离值,不确定度优于10%的已有超过5千万颗恒星。

盖亚还被巧妙设计成能同时开展恒星物理参数的直接测量。其焦面的测光区已产生15亿颗恒星的两波段星等。注意,实际被成像在测光区的是棱镜生成的天体低分辨率光谱。借助这些光谱,盖亚已测得5亿颗恒星的有效温度、表面重力常数、金属丰度(泛指氢和氦之外的元素)、星际消光量等基本参数。对于亮星,还可以从视向速度测量用的高分辨率光谱中提取更多物理信息。

为进一步展示盖亚强大的科学能力,从其已发表的浩瀚天文和天体物理学成果中撷取二三,合成图6以飨读者。左上所示是用1.5万颗近邻白矮星的盖亚数据绘制的赫罗图(绝对星等对应发光强度、而颜色指示温度),其分布偏离了不同质量白矮星的冷却模型,却符合一个有趣的、但多年来未能验证的理论预言:白矮星的内核会在冷却中固化结晶(释放相变潜热从而改变冷却过程)。左下突出显示了盖亚揭示出的一些特殊恒星(星号)和球状星

团(圆圈),它们的运动方向与银河系恒星主体相反,并且因其元素丰度而在赫罗图上占据特殊位置——理论模拟计算反溯出一个古老的矮星系,约在百亿年前被银河系吞噬,引发了内银晕和厚银盘这两大结构的形成,它被命名为盖亚-恩刻拉多斯(Gaia-Enceladus)。右图是银盘上6百多万颗恒星在相空间上的分布,呈现出优美的“蜗壳”状结构,很可能是数亿年前银河系最近一次与某个相伴矮星系碰撞所导致的相混合现象。

6. 额外的期待——从系外行星到“宇宙涟漪”

我们知道,恒星在系外行星的引力作用下,也会绕二者质心做小幅的开普勒轨道运动,早在一两百年前就有通过天测寻找系外行星的失败尝试。根据预估,盖亚的精度足以发现至少2万颗系外行星,但在第四版数据前不会透露相关结果。值得一提的是,佩里曼曾于2005年主持欧洲天文界的系外行星工作组,之后以一己之力编著了《系外行星手

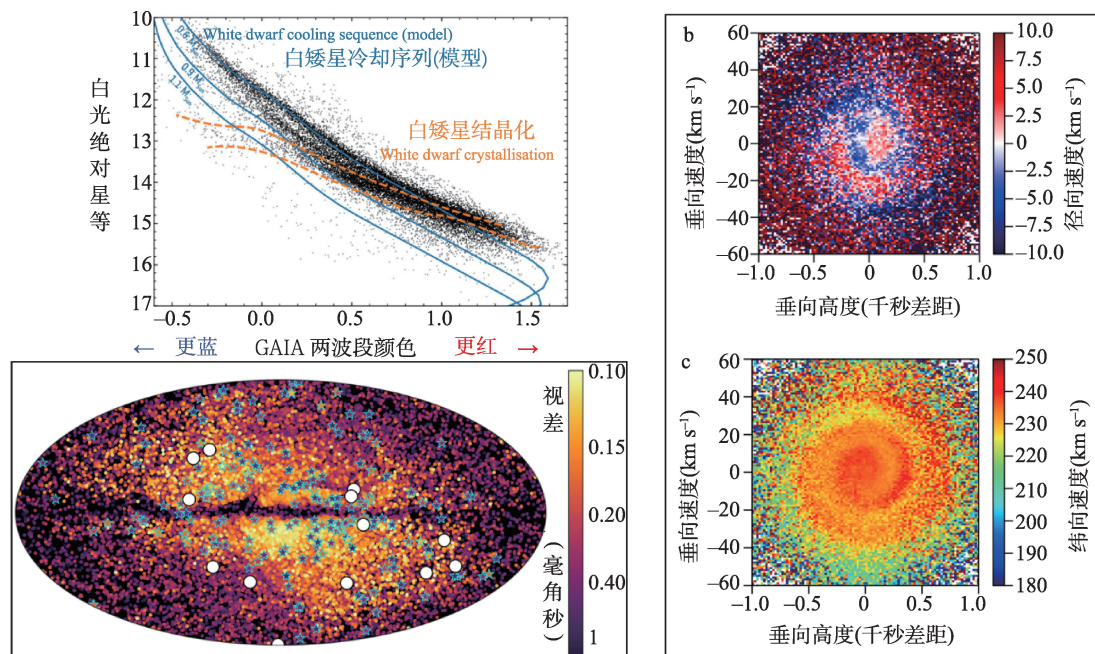


图6 盖亚几例有趣的科学成果:左上是赫罗图对白矮星内核结晶化理论预言的证实(图片来源:Tremblay等人、*Nature*期刊);左下用星号和圆圈标注出百亿年前撞入银河系的矮星系盖亚-恩刻拉多斯的“遗存”(图片来源:Helmi等人、*Nature*期刊);右图是银盘恒星在相空间上“蜗壳”状的相混合现象(图片来源:Antoja等人、*Nature*期刊)

册》这本优秀参考书,汇总了系外行星科学的技术、事实和理论。他是否正在热盼着盖亚树起系外行星探测的天测法大旗呢?

盖亚的高精度天测,要求在全地球都必须考虑太阳和地球对星光的引力偏折。反过来说,这也是对爱因斯坦广义相对论(及与之竞争的新引力理论)的重要检验,精度相对于依巴谷将会是一个巨大跃升。

盖亚数据还有望用于甚低频引力波的探测。近几年被地面探测器捕获的是恒星级质量黑洞或中子星的两两碰撞事件,信号频率高,只需要短的探测“臂长”;而尚待发现的甚低频引力波,可能源自星系中央超大质量的黑洞或双黑洞,信号周期长

达数月几十年,它们弹拨起光年尺度的宇宙涟漪,微微摆弄着所扫过天体的位置。一方面,对于一批双星系统中的毫秒脉冲星,可借由伴星的盖亚数据定出精确距离、自行等,帮助脉冲星计时阵提高甚低频引力波的探测灵敏度。另一方面,也可以在海量恒星的视位置变化中仔细寻觅引力波导致的大尺度下规则性的振动印迹,难点在于处理高达200太字节的盖亚数据,堪称大海捞针。幸运的是研究表明,有方法将数据压缩百万倍而仅损失1%的灵敏度,探测能力不逊于脉冲星计时阵。使用类星体的天测结果,也有可能在小数据量上实现同等灵敏度,因为它们极其遥远(但极明亮),内禀自行可忽略不计。



科苑快讯

自闭症谱系障碍的突破性治疗初见曙光

韩国科学家成功识别出自闭症谱系障碍的细胞特异性分子网络,这将为治疗自闭症谱系障碍奠定基础。该研究由大邱庆北科学技术学院(Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, DGIST)新生物学系(Department of New Biology)金敏植(Kim Min-sik 音译)教授团队在《分子精神病学》(*Molecular Psychiatry*)期刊上发表。

自闭症谱系障碍(Autism spectrum disorder)是一种已知从儿童早期发生的一种神经发育障碍,其特征是社会交流与互动相关行为的持续损害,导致行为模式、兴趣和活动范围受限以及重复行为。大多数自闭症谱系障碍患者除行为障碍之外,还伴有其他发育障碍。目前没有正确的分子诊断方法,以致早期诊断已相当晚。虽然行为管理疗法可以改善症状,但在分子水平上却缺乏有效的治疗方法。

金敏植教授组利用首尔大学医学院(Seoul National University College of Medicine)李容锡(Lee Yong-Seok 音译)教授组建立的谱系障碍小鼠模型“Cntnap2缺陷模型”,提取了前额叶皮层组织,并进行了基于质谱的



综合定量蛋白质组学和代谢组学分析。此外,通过与之前报道的自闭症谱系障碍患者的大数据进行比较和分析,该团队证实,问题出现在可兴奋神经元的代谢和突触等网络中。

金敏植说,通过这些研究开发的多组学集成分析技术,促进了对自闭症谱系障碍的病理学理解,他们正试图找到自闭症谱系障碍的核心网络,并通过综合分析各种模型去发现治疗靶点。

(高凌云编译自2022年12月25日SciTechDaily网站)