

巡视浩瀚星空 探索动态宇宙 ——维拉·C·鲁宾天文台全解析

詹 虎

(中国科学院国家天文台 100101;北京大学科维理天文与天体物理研究所 100871)



图1 维拉·C·鲁宾天文台

(图片来源: NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory/
NOIRLab/SLAC/AURA)

在智利北部安第斯山脉的帕琼山巅,海拔2647米的夜空之下,一座注定将改写天文学发展历史的旗舰级观测设施——8.4m口径的维拉·C·鲁宾天文台(Vera C. Rubin Observatory, <https://rubinobservatory.org/>)正快速巡视着星空。2026年2月24日夜間,它向全球发布了80万条变源警报,这一数字在正式巡天启动后将攀升至每晚约700万条,标志着人类首次具备对整个南半球天空极暗弱天体时域监测的能力。历经28年从构想到工程落成的艰辛旅程,这座由美国国家科学基金会(NSF)与能源部(DOE)联合主导、多国科研机构参研的宏伟设施,如今正蓄势待发,即将开启为期十年的新一代测光巡天。

一、从构想到落成:近三十载的追梦之旅

鲁宾天文台的构想源于人们对宇宙最核心课题的求索:暗物质和暗能量本质。无论是将常规物质束缚在星系、星系团内的暗物质,还是驱动宇宙加速膨胀的暗能量,均无法用已知的物理理论解释。在20世纪80、90年代的研究过程中,天文学家

们意识到,当时的观测样本对宇宙采样的广度、深度以及统计精度都远远不能满足精确刻画暗物质和暗能量属性的需求,也难以支撑它们的理论模型的严格检验。于是,J. Anthony Tyson于1998年提出了一架6 m级大视场巡天望远镜的概念,当时他称之为“暗物质望远镜”^[1]。这一构想迅速获得广泛响应,先后被美国天文学十年规划Astro2000^[2]和Astro2010^[3]列为优先支持的大型项目和最高优先级大型地基项目,并被命名为Large-aperture Synoptic Survey Telescope(LSST,后来省去了“aperture”),同时其科学目标也拓展到了天文学的诸多领域。

2015年4月14日,LSST在智利帕琼山址举行奠基仪式,建设全面启动。2019年,项目正式更名为维拉·C·鲁宾天文台,以致敬首位通过星系旋转曲线证实暗物质存在的杰出天文学家Vera C. Rubin,望远镜本体以关键资助者Charles Simonyi的名字命名为西蒙尼巡天望远镜,而LSST则被赋予了新的含义:Legacy Survey of Space and Time,即“时空遗产巡天”。

2025年4月15日,鲁宾天文台使用全规模相机对星空进行了首次工程曝光,初步图像显示望远镜的准直已接近最优状态。2025年6月23日,鲁宾发布首批图像(“Rubin First Look”),在仅仅约10小时的测试观测中便捕捉到数百万个星系、数千颗小行星,其中包含2104颗此前未被发现的太阳系小天体。经过半年调试,鲁宾天文台于2025年10月25日转入早期运行阶段,于2026年2月24日正式启动实时科学警报系统,首夜即发出80万条警报,覆盖超新星、变星、活动星系核及移动天体等多种类型。预计2026年下半年,为期十年的时空遗产巡天将正

式全面展开。

从最初的概念萌芽到最终落成,鲁宾天文台走过了近三十年光阴,堪称科学合作与工程技术的巅峰之作。正如维拉·鲁宾本人当年面对天文学界的性别偏见,以坚韧不拔的精神默默深耕星系动力学,最终改写了人类对宇宙的基本认知,这座以她名字命名的天文台同样象征着人类破解宇宙终极奥秘的不懈追求。

二、星辰之间:四大核心科学目标

鲁宾天文台的科学目标覆盖从太阳系到宇宙学的全尺度天文问题^[4,5],可归纳为四大主要方向:

解密暗物质与暗能量。暗物质约占宇宙质能的27%,暗能量约占68%,是现代物理最大的谜团。鲁宾将通过弱引力透镜、重子声学振荡、Ia型超新星、星系团计数、强引力透镜时间延迟等宇宙学探针,以前所未有的精度测量暗能量和暗物质属性,检验可能的物理模型。

动态宇宙的全景监控。时域观测能力是鲁宾的重要特色和优势。传统望远镜只能捕捉宇宙“瞬间快照”,而鲁宾却能持续追踪天体的亮度、位置和形态变化,覆盖从秒到十年的全时标动态事件。它预计能发现90%以上直径大于140米的近地小行星,将小行星防御从科幻构想转化为常态化的“例行科学”;通过监测银河系内数十亿颗恒星的光变,绘制出银河系三维结构;每年可发现数十万颗超新星,捕捉潮汐瓦解事件和千新星;监测千万个活动星系核的光变以破解黑洞生长之谜;并在引力波事件后数小时内扫描大片天区,捕捉电磁对应体,成为多信使天文学的关键一环。

绘制银河系三维地图。鲁宾将通过测光与自行测量,以前所未有的精度绘制银河系结构,解析星流、卫星星系等子结构,还原银河系的形成与合并历史,测量星际消光与尘埃分布。

太阳系小天体的普查。除近地天体防御外,鲁宾还将系统地研究太阳系起源:监测彗星、小行星的自转、光变与表面性质,发现柯伊伯带天体,为深

空探测任务提供目标与轨道数据。

三、巡天性能的革命性飞跃

鲁宾天文台究竟有多强?我们不妨将它与此前最具代表性的两个地基测光巡天项目——暗能量巡天^[6](Dark Energy Survey, DES)和茨威基暂现源设施^[6](Zwicky Transient Facility, ZTF)——进行对比,答案便一目了然。

暗能量巡天以深度和精度著称。2013至2019年间,它使用智利4米口径的Blanco望远镜,以90秒单次曝光、约10次重复观测,深度覆盖了5000平方度的南天区域,r波段图像叠加后的极限星等约为25.0等(5σ ,点源),测光精度达到5毫星等,为暗能量研究提供了关键数据。但它每片天区重访仅约10次,本质上是一项“深度普查”,无法系统地捕捉短时标动态事件。

茨威基暂现源设施则以广度和速度取胜。它发挥了美国帕洛玛天文台1.2米施密特望远镜47平方度超大视场的优势,自2018年以来,以30秒单次曝光、每3天一遍的速度扫描整个北天可见天空,每晚可产生百万条瞬变源警报,是目前光学时域天文学的主力。但受限于1.2米口径,其r波段单次曝光深度仅20.6等。

鲁宾天文台史无前例地将暗能量巡天和茨威基暂现源设施各自的优势集于一身,突破了深度、广度与速度不可兼得的传统瓶颈,并且显著提升了观测能力。这主要得益于其集光率指标,即望远镜主镜面积与视场面积的乘积。由表1可见,鲁宾的集光率是暗能量巡天的8倍、茨威基暂现源设施的6倍,意味着对同样的天体在同一波段内收集相同数量光子的前提下,鲁宾的巡天速度是暗能量巡天的8倍、茨威基暂现源设施的6倍。因此,鲁宾单次30秒曝光已接近暗能量巡天10次90秒曝光叠加的深度,同时可保持与茨威基瞬变源设施相同的每3天一次的重访节奏。如此强大的观测能力使得鲁宾不仅能够极大地拓展天体普查的宇宙体积范围,为星系宇宙学、银河系和恒星等研究领域提供前所

表 1 暗能量巡天、茨威基暂现源设施与鲁宾天文台的参数比较

比较项	暗能量巡天	茨威基瞬变源设施	鲁宾天文台
望远镜口径	4.0 m	1.2 m	8.4 m(有效 6.5 m)
相机像素	5.7 亿	6 亿	32 亿
视场面积	3 deg ²	47 deg ²	9.6 deg ²
集光率	38 m ² deg ²	53 m ² deg ²	320 m ² deg ²
巡天覆盖天区	5,000 deg ²	30,000 deg ²	18,000 deg ²
测光系统	g、r、i、z、Y	g、r、i	u、g、r、i、z、y
r 波段单次曝光深度	23.6 mag(90 s)	20.6 mag(30 s)	24.7 mag(30 s)
r 波段叠加图像深度	25.0 mag(10 次)	无统一叠加	27.5 mag(800 次)
实时警报能力	有限能力	每晚约 100 万条	每晚约 700 万条

未有的大样本,而且将录制一部持续 10 年的宇宙电影,为时域天文研究提供极其丰富的数据。

四、硬核实力:重塑天文观测规则的技术革命

鲁宾天文台的革命性,源于其硬件设计、巡天策略与数据系统三大核心能力的全面突破。

独特的光学设计。鲁宾承载的西蒙尼巡天望远镜采用了三反射镜消像散设计(见图 2),主镜口径 8.4 米,是全球最大的单片式反射镜面之一。其独特之处在于,主镜与第三镜合二为一,由一块整体镜坯研磨而成,从而实现了极快的焦比(f/1.233),并使望远镜结构极为紧凑,单次指向切换仅需约 5 秒,保障了巡天观测效率。配合 3.5 米次镜,望远镜实现了 9.6 平方度超宽视场,接近 50 个满月的大小,光学系统自身全视场像质控制在 0.2 角秒以内。

32 亿像素的数字“眼睛”。LSST 相机是鲁宾的“心脏”,也是人类制造的最强大天文相机:由 189 片 4K×4K 深耗尽 CCD 拼接而成,单张图像可填满 400 块 4K 电视屏幕;制冷至约-100℃以降低噪声,2 秒快速读出,单次曝光 30 秒,每晚平均可拍摄约 700 帧科学图像;配备了 u、g、r、i、z、y 六波段滤光片,滤光片可在 90 至 120 秒内快速切换。

十年“宇宙电影”拍摄计划。宽场巡天覆盖南天 18,000 平方度天区,每片天区累计观测约 800 次,每 2 至 3 晚重复扫描一次;另有约 10% 的观测时间用于对遴选的深场天区进行更高频次的深度观测。每晚将产生 10TB 原始数据,运行十年最终发布的



图 2 西蒙尼巡天望远镜光学系统
(图片来源:NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory/
NOIRLab/SLAC/AURA)

数据库预计达 15PB,将是届时最大的天文时序数据库。

时域天文的“神经中枢”。为捕捉超新星、引力波电磁对应体等瞬变天体,鲁宾搭建了全球最快的天文预警系统:图像获取后 60 秒内完成测光、比对、识别,发布暂现源预警。这套系统如同永不停歇的宇宙监测器,每次曝光后立即对图像进行差分分析,一旦发现任何亮度或位置发生变化的天体,便发布早期警报——这意味着任何超新星的爆发、任何移动的小行星、任何前所未见的天文现象,都可能在发生的 1 分钟内被全世界共享。

每晚 700 万条独立的暂现源警报显然无法由人工逐条查看。鲁宾在设计之初便构建了“代理系统”(Brokers),这些代理系统会对警报打上分类标签,与已知天体进行交叉匹配,为每一事件添加丰富的物理信息,包括天体类别的初步判定和科学价值优先级的评估。科学家由此可构建符合自身科研兴趣的定制警报流,如同为庞大的宇宙动态消息

流设置了精准的订阅话题。

五、初露锋芒：早期运行的突破性成果

截至2026年5月,鲁宾天文台处于早期运行优化阶段,已取得一系列里程碑式成果。

成像精度创历史纪录。团队完成了主动光学系统的全面升级,采用全阵列模式波前测量,利用50个光学自由度以校正视场内高阶像差。2026年4月18日,鲁宾创下全视场点扩散函数半高全宽优于0.6角秒的历史最佳成绩;在g、r、i、z波段,仪器自身对点扩散函数的贡献已稳定在0.4至0.45角秒水平,达到设计指标。

小行星发现创全球纪录。正式巡天尚未开启,鲁宾便已展现出颠覆性的太阳系发现能力。仅凭一个半月内积累的工程调试观测数据,其团队一次性向国际天文学联合会小行星中心提交了逾11,000颗新发现小行星的认证报告,这是过去一年中全球单批次规模最大的小行星发现。此次成果包含约380颗海王星外天体(TNOs)和33颗此前未知的近地天体,其中两颗TNOs的轨道极端拉长,远日点大约达到地日距离的1000倍,跻身已知最遥远的太阳系小天体之列。这还只是冰山一角,一旦正式巡天启动,鲁宾有望在运营初期每两到三个夜晚就发现同等数量的小行星,最终将已知小行星总数翻两番。

实时预警系统上线。2026年2月24日,鲁宾正式启动暂现源预警系统,首晚即发布了80万条警报,涵盖超新星、变星、小行星等。全面运行后,每晚将产生约700万条警报,使鲁宾成为宇宙动态事件的“全球警报器”。

数据计划稳步推进。目前已经发布了部分模拟数据和1/21规模焦面的工程调试相机观测数据,正式相机的科学性能验证数据计划于2026年7至9月发布,将包含深场模板图像与源星表;首版正式数据发布预计在巡天正式启动后一年左右推出,将覆盖全部科学目标。

六、开启天文学新纪元

鲁宾天文台的十年时空遗产巡天即将正式启动,凭其超宽视场、超高灵敏度、超快巡天速度与实时数据处理能力,它将以“深-广-快”的观测模式,把整个南半球可观测天空转化为一部跨度长达十年的宇宙电影。毫无疑问,鲁宾最令人激动之处在于它将提供的巨大发现空间。从近地小行星的探测与监测,到超新星的惊天爆发;从银河系恒星的脉动变化,到暗物质、暗能量的物理本质——这座以揭示暗物质存在的先驱科学家命名的天文台,将用一幅幅图像、一条条暂现源警报书写这个动态宇宙的壮丽史诗。

与此同时,韦伯空间望远镜(JWST)、欧几里得任务(Euclid)、罗曼空间望远镜(Roman)、三十米级望远镜(ELT、GMT、TMT)、平方公里阵(SKA)和我国的巡天空间望远镜(CSST)等重大天文观测设施已经或将在数年内陆续投入运行。鲁宾天文台与这些设施的协同将有效地构建全波段宇宙观测网络,大幅提升科学效益,为人类开启一个全新的宇宙认知时代。

参考文献

- [1] Tyson, J. A. 1998, Dark matter tomography, SLAC Summer Institute 1998: Gravity from the Planck Era to the Present, SLAC/DOE Pub. SLAC-R-538 pp 89 - 112 (http://slac.stanford.edu/gen/meeting/ssi/1998/manu_list.html)
- [2] National Research Council 2001, Astronomy and Astrophysics in the New Millennium (Washington, DC: National Academies Press) (<https://doi.org/10.17226/9839>)
- [3] National Research Council 2010, New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics (Washington, DC: National Academies Press) (<https://doi.org/10.17226/12951>)
- [4] Ivezić, Z. et al. 2019, LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products, *The Astrophysical Journal*, 873, 111
- [5] Zhan, H. & Tyson, J. A. 2018, Cosmology with the Large Synoptic Survey Telescope: an overview, *Reports on Progress in Physics*, 81, 066901
- [6] Abbott, T., Abdalla, F. B., Aleksić, J., et al. 2016, The Dark Energy Survey: more than dark energy—an overview, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460, 1270
- [7] Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Barlow, T., et al. 2019, The Zwicky Transient Facility: Surveys and Scheduler, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131, 068003