ILAN-ES期间从国际空间站观测闪电和瞬态发光事件：一位宇航员的视角

Yoav Yair*(1)、Melody Korman (2,3)、Colin Price (2) 和 Eytan Stibbe (3)

(1) 赖希曼大学可持续发展学院（IDC赫兹利亚），以色列 (2) 特拉维夫大学波特环境与地球科学学院，以色列 (3) Rakia任务，特拉维夫，以色列

投稿至《航天学报》

2023年3月

*通讯作者：Yoav Yair 教授，可持续发展学院，赖希曼大学（IDC），赫兹利亚，邮政信箱 167，University Street 8 号，赫兹利亚 4610101，以色列 (p) +972-9-9527952 (m) +972-52-5415091 (f) +972-9-9602401 电子邮箱：yoav.yair@runi.ac.il

关键词：闪电；雷暴；瞬态发光事件；国际空间站；地球观测

摘要

ILAN-ES（太空闪电与夜间发光成像）实验由以色列宇航员 Eytan Stibbe 于2022年4月执行，是 Axiom Space 公司 AX-1 私人任务的一部分。该任务前往国际空间站，并在 Rakia 框架下开展；Rakia 是由拉蒙基金会和以色列航天局遴选的飞行实验项目。任务目标是根据提前24至36小时上传给乘组的初步雷暴预报，由宇航员在国际空间站的 Copula舷窗处手动记录闪电和瞬态发光事件。实验使用配备50毫米镜头的 Nikon D6 相机，以每秒60帧的视频模式拍摄。在为期15天的任务中，共有82个不同目标上传至国际空间站，其中20个由宇航员拍摄，最终共记录到45个瞬态发光事件：红色精灵、精灵和蓝色电晕放电。本文介绍了国际空间站宇航员采用的方法及其执行过程，并提出了未来使用国际空间站上由人员操作的仪器开展观测的建议。

1. 引言

红色精灵、光环和精灵似乎普遍存在于全球雷暴上方的中间层，在地球上大多数主要闪电活动中心上空都曾观测到它们。然而，它们的全球发生率仍难以确定，尚未得到明确测定（Chern 等，2008年）。因此，地球空间观测提供了有利的观测视角，能够持续监测这些大气现象并实现大范围覆盖。基于太空的闪电诱发瞬态发光事件观测平台，可以克服地面测量的诸多局限，尤其是基于固定地点测量固有的局部性，以及视线受阻和云层遮挡等问题。由此可以推断其全球发生率，并将其与母体风暴的气象特征相关联。

2003年1月，在哥伦比亚号航天飞机执行地中海以色列尘埃实验（MEIDEX）期间，首次开展了宇航员控制的太空闪电和瞬态发光事件定向观测（Yair 等，2003）。在这项为期16天的任务中，白天的主要任务是研究尘埃对地中海上空云层及辐射传输的影响；作为次要科学目标，任务还安排在轨道的夜间部分从太空对瞬态发光事件进行全球成像。由于轨道速度高达 8 km s^{-1}，必须至少提前24小时确定潜在的雷暴目标，以便安排观测时段。观测采用地球边缘指向，使母体闪电与其诱发的瞬态发光事件之间形成垂直间隔，从而在图像中清晰区分二者（Boeck 等，1998）。任务期间，美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心载荷运行与控制中心（POCC）的地面机组利用根据群到达时间（TOGA）网络（该网络后来发展为全球闪电定位网 WWLLN；Rodger 等，2006）获取的闪电位置，改进了初步预报。这样一来，实际观测时间前可留出4.5小时进行最终准备，并微调相机指向角；相关指令经任务控制中心传达给负责开展观测的机组成员，

观测。据 Yair 等（2004）报告，在任务期间分配用于瞬态发光事件观测的24个轨道窗口中，最终节省了近6小时宝贵的观测数据采集时间（详情见其表1），并探测到17个瞬态发光事件。这一探测率明显高于航天飞机固定相机观测活动（中尺度闪电实验；Boeck 等，1998）或国际空间站固定相机观测活动（LSO，由法国和比利时宇航员执行；Blanc 等，2004）。

2011年，日本宇宙航空研究开发机构的宇航员古川聪博士在国际空间站第28/29次远征期间开展了“Cosmic Shore”观测活动。其观测方案更加灵活，可根据宇航员对下方大气层的观察，通过穹顶舱窗调整相机指向。为充分利用有限的观测时间，Yair 等人（2013）采用相同的方法，利用显著天气图提前48小时通知乘组，并将通知整合到每日上传至国际空间站的 JEDI消息中。与航天飞机不同，国际空间站无法通过机动来改善对潜在雷暴目标的视线，但穹顶舱提供的宽阔视场足以弥补这一不足。“Cosmic Shore”使用彩色电子倍增CCD电视摄像机，成功记录了10个彩色瞬态发光事件，同时拍到了首张精灵-光晕图像，以及首张无歧义的精灵天底视角图像；该精灵与母闪在水平方向上存在偏移（Yair 等人，2013）。该观测活动的不足之处在于，相机图像缺少精确时间戳（~1秒），且未能可靠记录指向方位角，因此难以将观测到的瞬态发光事件与 WWLLN 等全球网络探测到的闪电位置相关联。尽管如此，这次观测活动再次凸显了只要提前获得准确的闪电预报，就能在国际空间站上高效利用宇航员的时间。另一项从太空开展的定向瞬态发光事件观测活动是 THOR实验，由丹麦宇航员 Andreas Mogensen 在其于2015年9月1日至10日执行的国际空间站短期任务（IRISS）期间进行。该实验旨在通过空间站舷窗，使用光学摄像机观测过冲积雨云塔状云体、闪电和高空瞬态发光事件。为支持这项实验，我们制定了一套策略，可提前最多三天预测雷暴目标的位置；这一较长的提前期是宇航员活动规划人员为短期任务安排多项实验所需的。我们在预报中加入了新的补充要素，以便整理并确定每日目标列表的优先级，并根据国际空间站的位置和高度计算具体观测角度。Chanrion 等人（2017）发表了 THOR观测活动的结果以及新电学现象的发现。

除偶尔进行乘员控制的观测外，国际空间站上的多个自主载荷也已在长期运行期间成功从轨道探测到瞬态发光事件。日本JEM-GLIMS实验于2011年至2015年运行（Sato et al., 2016）。在近4年的运行期间，GLIMS共探测到8537起重叠闪电和瞬态发光事件；经事后分析，其中699起被判定为瞬态发光事件，包括508起精灵和42起红色精灵，另有149起尚待确定。Neubert et al. (2021) 报告称，作为ASIM（大气-空间相互作用监测仪；Chanrion组成部分的MMIA成功拍摄到了从雷暴云顶部喷发的蓝色喷流的发展过程

et al., 2019; Neubert et al., 2019）载荷通过自动记录成功完成了成像，无需乘组成员或地面人员进行任何预设的手动操作。Bjørge-Engeland et al. (2020)、Liu et al. (2021) 和 Skeie et al. (2022) 报告了蓝色喷流事件和高能辐射，Neubert et al. (2023) 对这些结果进行了综述。这两种载荷清楚地表明，轨道上的相机能够相当频繁地探测到瞬态发光事件及其他与闪电相关的辐射。

2. ILAN-ES任务设计

ILAN-ES活动是作为Rakia任务的一部分规划的，该任务隶属于Axiom Space公司首次私人前往国际空间站的探险（AX-1）。该活动由Rakia科学委员会选定，委员会成员包括以色列大学、拉蒙基金会和以色列航天局的代表。委员会对以色列初创公司和科学家提出的70多项太空实验提案进行了梳理。ILAN-ES是获选搭载执行任务的34项实验之一，其设计承袭了2003年开展的MEIDEX活动，旨在通过仅在指定时间设定选定观测目标供宇航员拍摄，优化国际空间站上的观测时间。这样规划是为了确保在相对短暂的任务中取得丰硕的科学成果。结合对母体闪电的地基观测，以及从地面同时对特定事件进行光学成像的可能性，有望为瞬态发光事件的三维结构提供新的科学数据。该任务于2022年4月8th日搭乘Space-X猎鹰9号运载火箭发射，并于2022年4月25th日返回地球，在轨道上停留超过17天。以色列宇航员 Eytan Stibbe是4名乘组成员之一，在任务计划中被赋予PA-3（私人宇航员3号）的称号。以下各节将介绍宇航员通过Copula舷窗开展观测的各个方面。

2.1 国际空间站乘组时间表中的雷暴目标

为提前让乘组了解潜在雷暴目标的出现时间（=地理位置），Ziv 等人（2004）设计了一种方法，依据航空气象中心（AWC）每日发布的重要天气图（SIGWX）。在 AX-1 任务期间，以色列气象局会自动获取这些天气图，并上传至 FTP 服务器。图中突出显示深对流区域，并标示可能出现嵌入式或孤立积雨云的位置、覆盖率以及预计云顶高度。图1展示了2022年4月19日发布的一张天气图，该图用于预测 T+36 h 时的积雨云云顶高度。根据预计高于 ~14 km 的积雨云云顶高度及其他气象因素（Ziv 等人，2014年；Yair 等人，2016年），确定了若干潜在目标。结合预测的国际空间站轨道（使用卫星工具包 [STK] 软件），制定了一份目标清单，并每日发送给 NASA/TCO 团队。该团队将这些目标加入 2022年4月22日执行包 [或 JEDI] 中的每日乘组地球观测（CEO）时段（附录1）。

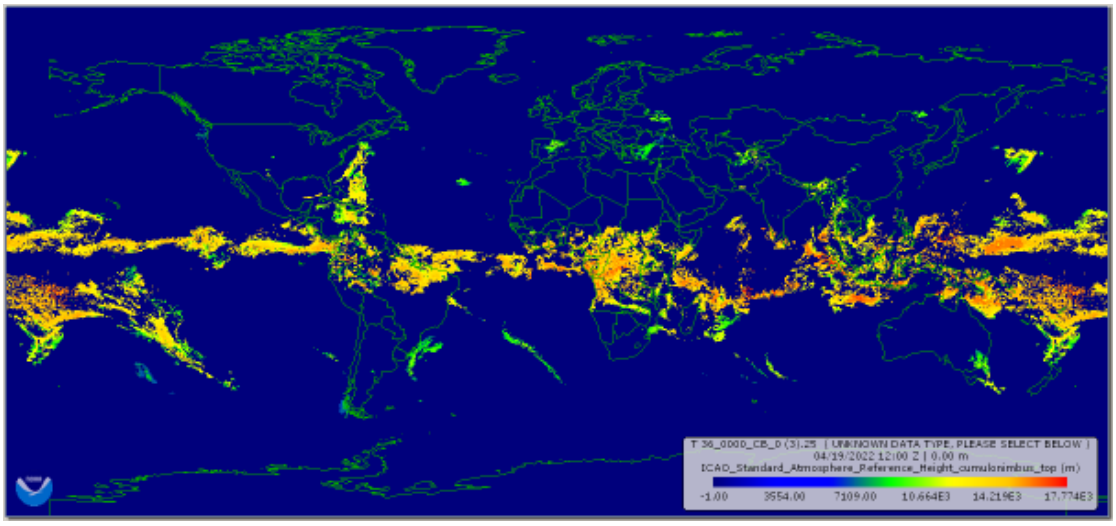


图1：2022年4月19日12:00世界时起报、有效期为36小时的积雨云高度预报图（单位：千米）。

CEO运行模式多年来一直应用于国际空间站，并取得了可观的科学成果（Gebelein 和 Eppler，2006年；Robinson 等人，2002）。因此，任务规划人员能够安排观测时段，由宇航员在指定时间（每次15至20分钟）执行，以飞越选定的感兴趣区域（ROI）。选定的目标被录入国际空间站 OpTIMIS（运行规划时间线集成系统；Beard，2018年）飞行信息查看器。该查看器在 iPad 上以图形方式显示全体乘组的每日活动，还包含昼夜信息和 TDRS 卫星覆盖可用性。每位宇航员每日任务清单中的时效性实验或任务均以蓝色标示（图2）。

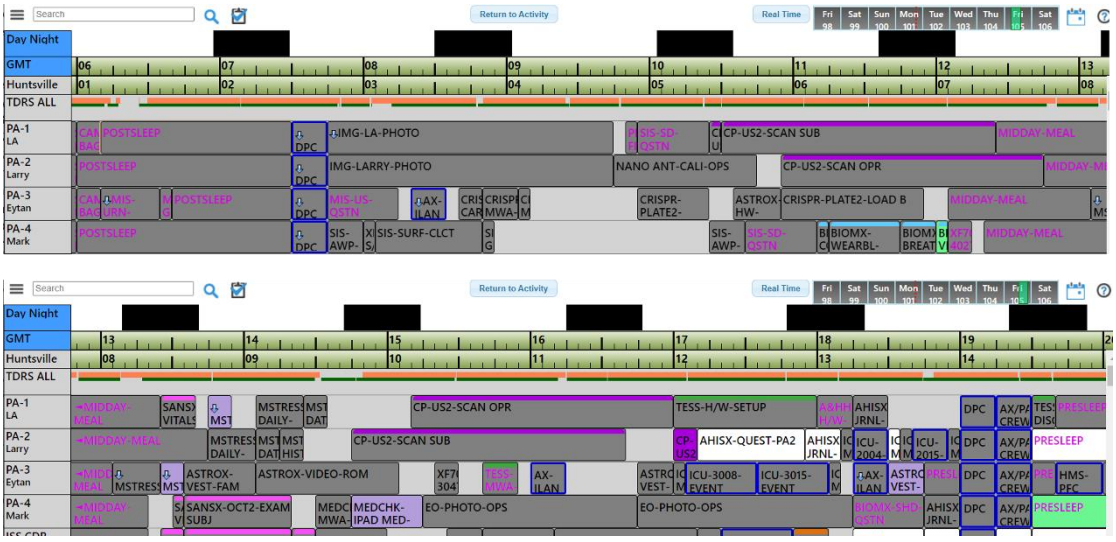


图2：AX-1乘组第7天（2022年4月15日）的OpTIMIS时间线摘录。请注意，PA-3包含3个ILAN-ES目标，已用蓝色标出。

由于国际空间站宇航员的标准工作时间为世界时 0700 至 2000，因此必须在实际观测前一天不晚于世界时 1100 发送观测目标；这一事实也将潜在目标限制在特定的夜间

轨道区段内，即国际空间站在乘组工作时间内经过的轨道区段。Rakia任务期间乘组实际可用时间决定了对可用目标进行优先级排序，因此科学团队必须选择每日最多 5 个观测窗口，并评估其中闪电活动强烈的概率最高的窗口。这些目标会作为高优先级任务传达给乘组，但随着任务运行的实际情况不断变化，宇航员还需判断自己是否能够在指定时间完成整个观测过程。有时，由于日程冲突以及此前宇航员任务造成的延误，ILAN-ES目标会被跳过。

2.1 Copula中的相机设置与操作

ILAN-ES任务期间使用的相机为Nikon D6，设置为6400 ISO，并以每秒60帧的速度录制1920 x 1080像素的视频。相机配备50mm/f1.2镜头，视场为34.4° x 19.75°，相当于每像素1.07′。应将焦点设为无限远并加以确认。采用这些设置时，相机在天底处的分辨率为130米。在ILAN-ES任务中，AX-1乘组将相机带上国际空间站；截至目前，它尚未列入国际空间站现有相机设备清单。宇航员在国际空间站的Copula舷窗处操作相机，目视追踪闪电活动，并将相机对准明亮的闪光，使其位于画面下部，同时让天空占据上部，以便拍摄高层大气放电现象。这样，在斜视或地平线视角下，可以捕捉到发生在可见闪电上方的瞬态发光事件；这种视角能更清晰地分隔闪电及其上方的瞬态发光事件，并提高成功观测的概率。每次观测过程安排为5至10分钟，因为观测目标的范围可达数百公里。

将相机设置为适当成像配置所需的时间可能长达 10 分钟，因为 Copula 中的相机并不总是位于指定的固定位置，也可能因先前的使用而完全缺失。因此，为CEO时段 定义的总时间段应为约 20–25 分钟。至于在 Copula 内进行整理，为了完成成像序列，需要以能够减弱内部反射的方式包裹相机，并在相机机身和镜头周围放置由黑色不透明材料制成的适当遮光罩。观测期间应注意避免相机接触任何窗户，以防止产生内部划痕和造成永久性损坏。此外，还应尽量减少 Copula 附近国际空间站其他区域的照明，以避免杂散光污染。

2.2 指向与跟踪

在微重力环境中漂浮，使目标捕获和跟踪变得颇具挑战，因为瞄准观测目标依赖于目视识别雷暴。从国际空间站上可以观测天底至地平线范围内的闪电，覆盖的投影区域半径为 ~2300 km（具体取决于轨道该段的国际空间站高度）。当预定观测时间临近时，广阔的

风暴水平延展范围较大，便于提前目视识别，前提是宇航员知道应将注意力集中在哪个 Copula舷窗上。通常，左舷／右舷的定义以国际空间站速度矢量参考系为准。然而，Copula舱内的宇航员头朝下漂浮，头部朝向国际空间站下方的地球，这可能使他们在自身参考系中难以分辨哪一侧是左舷、哪一侧是右舷。轨道夜间缺少运动线索，可能会加剧这种迷失感，使人更难根据黑暗背景准确判断国际空间站的运动方向。请注意，与透过 Copula舷窗无遮挡的视野相比，相机视场有限；透过舷窗则较容易识别闪电目标。因此，使用相机记录数据时，通过相机取景目镜观察并不实用，最好观看相机屏幕上的景象，不过必须承认，屏幕可见范围也受指向角度限制。

当雷暴嵌入中尺度对流系统（MCS）或中尺度对流复合体（MCC）中时，覆盖范围可能很大，面积可超过 20,000 km^2 (Goodman 和 MacGorman, 1986年; Houze, 2004年)。国际空间站以 8 $km\ s^{-1}$ 的速度穿过预测区域时，宇航员可用于观测的总时间平均为 5–7 分钟，具体取决于 MCC 相对于国际空间站轨迹的位置。宇航员可以动态调整相机的指向角，跟踪主要电活动中心，从而延长观测时间。在观测过程中，这往往需要在 Copula 内切换窗口，因此宇航员必须灵活操作并稳定跟踪，同时手持相机，将其对准缓慢移动的观测目标。为便于飞行后的分析，必须将指向信息记录在个人 iPad 的 Crew Notes 中。如果缺少这些信息，可通过图像中可见的国际空间站部分（如联盟号飞船或太阳能电池板）重建指向方向。

2.3 时间信息

对于太空科学观测而言，视频图像上的时间戳至关重要。尤其是在搜寻由闪电产生的亚毫秒级瞬态发光事件时，时间戳更是关键。由于上述所有地基闪电探测系统都使用全球定位系统时间源记录事件，任务的一项基本要求就是相机图像上的时间戳尽可能准确。国际空间站的计时由原子钟和来自地面无线电台的时间信号共同维持，并由任务控制中心定期更新。因此，在操作相机时，宇航员最重要的职责之一，就是确保整个任务期间相机时间尽可能接近国际空间站时间。

对 ILA-ES 期间所获数据的分析表明，图像时间与闪电探测系统的 GPS 时间基准之间存在偏差。2022年4月15日世界时 08:32:51.48 观测到的红色精灵事件最能说明这一点：该事件持续了 2 帧，发生在 08:32:50.86 首次探测到闪电之后。观测目标提前 36 小时被预测为新喀里多尼亚努美阿以西的一个海洋对流中心，观测窗口的开始时间设定为世界时 08:27:00（地面位置 22.27 S 166.44 E），持续 5 分钟；天底观测时的最近点定为 26.91 S 152.63 E。这是该任务日设定的 7 个3rd 观测目标中的一个，其中只有 2 个得以执行。图 3a 展示了包含红色精灵的那一帧；它是母体闪电发光的 79 帧中的第 38 帧（每帧为 1/60 秒，即 0.01667 秒）。从闪电起始到红色精灵出现的 0.6334 秒延迟，属于“长延迟”红色精灵（Li et al., 2008; Soula et al., 2017）。相机拍摄到的闪电发光总时长为 1.316 秒，表明存在持续时间较长的持续电流，这是产生红色精灵的闪电常见的特征（Bell et al., 1998 Cummer and Stanley, 1999）。



图3a：2022年4月15日世界时08:32:54.48，法国属新喀里多尼亚西南方积雨云砧上方的红色精灵。地平边缘附近的日落，观测方向为西北方。闪电与国际空间站之间的距离为682公里。图像由Eytan Stibbe/ Rakia任务/ ILAN-ES科学团队提供

根据 ENTLN数据，发生于世界时 08:32:54.700 的一+128.72 kA 闪电最有可能是该红色精灵的母闪。其位置为南纬 28.31 23、西经 162.971 东？并且由于国际空间站正向东南方向飞行，从 682 km 的距离处对其进行了斜向观测。WWLLN 在世界时 08:32:54.701 识别出该闪电，坐标完全相同。该雷暴中红色精灵发生前后的其他闪电要么是云内闪电，要么是较弱的负地闪，不具备产生红色精灵的能力（见附录2中的表格）。根据红色精灵在连续电流中的发生时间，相机时间与地面系统的全球定位系统时间基准之间存在 3.84 秒的偏差，相机时间提前（08:32:54.70 – 08:32:50.86）。这一偏差对于事件发生时的国际空间站位置（~30 km）影响很小，但对于确定其他瞬态发光事件的母闪时间至关重要，尤其是 2 个在同一积雨云单体上方于世界时 08:35:28.4 和世界时 08:36:01.29 被观测到的精灵

。可以得出结论：Nikon D6 上时间的设置应由宇航员相对于国际空间站时间尽可能准确地完成，并在整个任务期间核查是否存在漂移。分析结束后，通过仔细匹配特定事件（闪电或瞬态发光事件，或两者兼有）的光学观测与地基观测，可以推导出全球定位系统时间与国际空间站相机时间之间的精确偏差，随后即可对整个数据库实施必要的修正。



Fig图3b：同一雷暴单体中的精灵，世界时2022年4月15日08:35:28.40。视差 t flas距国际空间站1813公里。图像由 Eytan Stibbe/Rakia任务/ILAN-ES科学团队拍摄

2.3 数据处理与乘组备注

完成观测并撤离 Copula 后，宇航员取出相机的存储卡，并将其插入空闲的国际空间站工作站，以下载视频。文件会上传至 Download 子目录，并根据其所属实验（或约定的其他规则）命名，随后发送至地面进行处理和分发。数据可能需要长达48小时才能通过 Box 文件共享应用程序供分析使用。数据传输完成后，相机存储卡会被清空，以便再次使用。因此，在任务期间，科学团队需要等待一段时间才能评估观测所得数据的质量。如果需要调整镜头或相机设置，这一点可能至关重要。ILAN-ES任务期间，团队担心图像噪声水平过高，因此尝试将 ISO 感光度降至3200（而非标称值6400）。TCO 将这一调整告知乘组，并在数个观测轮次中予以实施；分析后，设置恢复为原始配置。

宇航员可以添加简短精炼的 Crew Notes，用文字描述观测场景。在 ILAN-ES 任务期间，记录雷暴强度的信息

以及观测到的闪电闪光频率（高、低、无）和任何显著现象（“蓝色闪光”？）。只有在完成观测后，这些乘组记录才会通过任务控制中心中能够访问 OpTIMIS 的代表提供给科学团队，远早于数据下载。

3. 短时观测

宇航员在夜间进行观测，需要敏捷、专注，并在执行过程中灵活调整空间方位。尽管观测可能仅持续5–8分钟，但即使是更短、仅1分钟或更短的观测，也有望取得丰硕的科学成果。为说明这一点，我们回顾一次发生于2022年4月21日的雷暴观测。该观测被列入目标列表中最后一条轨道（附录1）；当国际空间站在印度洋上空向东北方向移动、飞往缅甸时，宇航员奉命从马达加斯加附近开始进行天底指向，时间为21:17:00世界时，预计观测结束时日出。观测于（按上文所述校正偏移后的时间）21:12:22.84世界时开始，并被分为9段非常短的视频片段。最后一段视频片段于21:30:27.84开始，当时国际空间站位于安达曼海上空，该片段仅持续30.33秒。此外，国际空间站接近昼夜分界线时，最后13秒的画面已经受到阳光干扰，因此仅剩下~17 秒的有效数据。

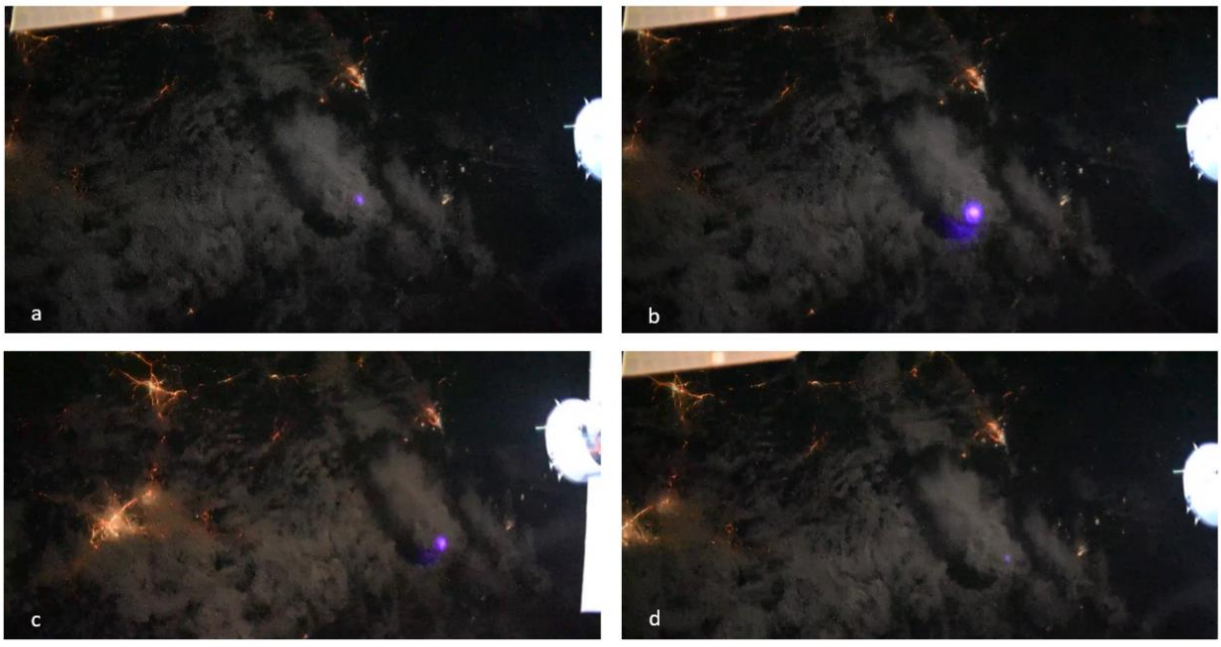


图4：2022年4月21日，在印度布莱尔港上空进行17秒观测过程期间探测到的4次蓝色电晕放电的天底视角。云层下方的城市灯光清晰可见。所选事件分别发生在世界时21:30:27.84之后的(a) 0.57秒、(b) 2.22秒、(c) 4.87秒和(d) 14.11秒。国际空间站在17.33秒时日出。图像由Eytan Stibbe/Rakia任务/ILAN-ES科学团队提供

宇航员观察到位于印度布莱尔港上空的一个活跃积雨云单体中的穿透性云塔（11°40' N 92°44' E）。21:28:00，国际空间站位于11.47 N 92.77 E，在该城市的略偏东侧。在8.5秒的时间跨度内，记录到11次蓝色电晕放电事件（Dimitriadou等人，2022年），每次持续1帧，娱乐主管

这些事件记录于积雨云的砧状云顶和穿透性云塔上方，并与该单体产生的闪电间歇出现。图4以空前的清晰度展示了其中一些蓝色发光事件。这些蓝色发射伴随窄双极事件（NBEs），主要发射波长为 337 纳米，表明它们是电晕放电（Liu 等，2021）。此处观测到的所有蓝色喷流事件似乎都位于云顶，这表明它们发生在上部正电荷中心与紧邻云顶上方的负屏蔽层之间（见 Neubert 等，2023 年的图4）。计算得出的发生率为每秒 0.64 次，即平均每隔 ~1.54 秒出现一次蓝色喷流事件，这与 Chanrion 等人（2015年）报告的发生率一致。（对该雷暴的气象和电学特征进行进一步分析超出了本文的范围，将在后续论文中发表。）此例展示了即使是对活跃雷暴进行极短的视频记录也具有很高价值，并说明通过人工控制相机经 Copula舷窗进行指向，可提高实时选择观测目标的准确性。

4. 地面观测活动

作为任务科学目标的一部分，ILAN-ES 得到了广泛地基观测网络的补充，旨在尝试同步开展太空与地面瞬态发光事件（TLE）及闪电观测。目前，有几个由公民科学家组成的 TLE 探测网络，利用地基相机开展光学观测，覆盖中欧（以匈牙利和克罗地亚为中心）、加勒比地区（波多黎各）以及南美洲。尽管太空与地面同步观测的概率较低，但各个业余观测网络提供的全球覆盖范围提高了实现天地联合探测的机会。参见：https://www.facebook.com/groups/376355972487572此外，我们还与来自各大学的国际研究团队建立了合作关系。这些团队包括：（1）图卢兹大学在米迪峰天文台（比利牛斯山脉）和留尼汪岛（印度洋）的设施；（2）巴塞罗那加泰罗尼亚理工大学，以及位于哥伦比亚圣玛尔塔的观测站点；（3）中国科学院（北京）的相机网络；以及（4）位于巴西中部的 LEONA 网络。作为整个 Rakia 任务中优先级较高的教育项目组成部分，我们向以色列、加纳、卢旺达、津巴布韦、巴西和中国香港的学校分发了相机，希望高中生能够根据当地的雷暴预报，在国际空间站飞越上空期间参与光学观测。

任务期间，赖希曼大学可持续发展学院的一组学生负责与学校教师沟通，告知他们国际空间站的飞越时间，并鼓励他们在学校所在地区确实预报有雷暴时进行观测。遗憾的是，任务期间大多数学校都在放复活节假期，无法配合 ILAN-ES 的飞越开展观测。至于其他地面位置，尽管曾有一些共同观测雷暴的良机，但最终未能成功，主要原因是地面站受到云层遮挡或出现技术故障（S. Soula、O. van-der Velde，个人通信）。这并未减损尝试开展未来地面与太空协同观测的重要性

，而且最重要的是，为科学、技术、工程和数学教育提供了宝贵机会（Bonnie 等，2014年；Phillips 等，2019年）。美国国家航空航天局最近启动的公民科学项目“Spritacular”或可成为这样一个平台（https://spritacular.org/；访问日期：2023年3月1日）。

5. 结论

国际空间站是一座在轨平台，为全球大气观测提供了无与伦比的视角。站上配备了十多台相机，宇航员用它们执行各种任务并开展地球观测，但主要采用机会式观测或按需观测，针对热带风暴、火山喷发和森林火灾等特定地球事件；相关影像随后通过NASA地球观测站向公众发布（https://earthobservatory.nasa.gov/；访问日期：2023年3月2日）。大多数影像在白天拍摄，拍摄时间会以乘员地球观测消息格式录入乘组的每日执行包。然而，几乎没有（甚至完全没有）为夜间观测设定的目标，因此在大部分轨道夜间，Copula都未得到充分利用。

地球上几乎各处都频繁发生雷暴，尤其是在热带地区的陆地上，但海洋上空也很常见，而且从太空中很容易观测到。气候变化的未来情景预测，雷暴和闪电的发生频率、强度及地理分布将会增加，并带来显著的气候影响（Chen等，2021年；Qie等，2021年）。根据夏季和冬季半球产生红色精灵的风暴的气象特征，可以轻松确定地球主要对流区域的每日观测目标（Williams和Yair，1006年）。

国际空间站上的 ASIM 载荷持续运行（Neubert 等，2023），以及美国空军的 Falco-Neuro 载荷（ McHarg 等，2022 ）等更多新观测能力的加入，使人为引导的光学观测极具价值。通过周密规划，让国际空间站上的 2 或 3 个平台同时观测此类闪电相关现象并不复杂，也完全可行。上述人为引导观测的操作方法及科学价值，为继续从太空研究雷暴和瞬态发光事件提供了支持。这类研究所需的额外预算很少，也可作为未来私人航天任务中乘组的一项补充科学目标。新的长期任务可能会提升成像能力，将高帧率、高分辨率相机带上国际空间站。基于 Rakia 任务和 ILAN-ES实验期间积累的经验，可以优化乘组时间安排。

致谢 ILAN-ES 项目

这项工作得到了赖希曼大学内部研究基金和特拉维夫大学加拿大之友的支持。感谢丹麦技术大学允许我们通过其 ASDC 服务器计算国际空间站的位置。

感谢以色列气象局的 Nir Stav、Evgeny Brainin 和 Vladimir Meerson 在获取航空天气图方面提供技术支持。

感谢 Eliran Hemo（拉蒙基金会）、Brandon Williams（Axiom Space）、Jim Watson、Ryan Miller 和 TCO 团队（NASA 马歇尔太空飞行中心）在任务规划和执行方面提供帮助。

赖希曼大学可持续发展学院的学生团队成员包括 Noah Gordis、Adam Bernitz、Linoy Levi、Bar Amrami、Bosco Nshimiyumukiza、Yuval Sheleg、Ryan Khalill、Daniel Telkar 和 Rebecca Mingeleva；Tali Livne 提供行政支持。

附录1 表格展示

通过 Axiom 任务支持发送给 NASA/TCO 的 2022年4月21日观测目标列表。在14个目标中，只有5个被列为优先观测目标（以黄色标记）

每日轨道编号	中央参考位置	中央参考点	起始 Time GMT	起始点	最近 Time GMT	最近点	附加信息
5	库斯科，秘鲁 -> 哥伦比亚	南纬 13.53° 西经 71.96°	07:24:00	南纬 12.79° 西经 72.37°	07:30:00	北纬 5.49° 西经 50.25°	雷暴 Port
6	奥克兰 新西兰	南纬 36.85° 174.76 E	08:40:00	51 S 157 E	08:45:00	44 S 132 E	雷暴 右舷
6	加拉帕戈斯群岛 -> 巴拿马	0.18 S 78.47 W	09:00:00	3.1 S 88.94 W	09:04:00	9.06 北 西经 80.27°	雷暴 纳迪尔与波特
7	奥克兰 新西兰	36.85 南 174.76 东	10:10:00	51.73 S 161.82 E	10:15:00	48.77 S 169.4 W	雷暴 Port
8	奥克兰 新西兰	南纬 36.85° 东经 174.76°	11:50:00	45 S 东经 177°	11:55:00	34 S 东经163度	雷暴 Port
10	汤斯维尔 澳大利亚 -> 所罗门王	南纬 19.25° 东经 146.8°	15:05:00	南纬 22.0° 东经 162.1°	15:12:00	南纬 1.04° 东经 178.1°	雷暴 Port
11	泗水， 印度尼西亚	南纬 7.25° 东经 112.75 度	16:40:00	南纬15.69° 东经 143.8°	16:45:00	0.05 午顿 东经154.9°	雷暴 纳迪尔与波特
12	雅加达 印度尼西亚	南纬6.2° 106.8°东经	18:15:00	9.1 S 东经 125.2 度	18:22:00	4.89 北纬 东经105.4°	雷暴 大厄与港口
13	班达亚齐 印度尼西亚	北纬5.54° 东经 95.32 度	19:50:00	南纬2.5度 东经106.36度	19:54:00	北纬9.68度 东经115.0度	雷暴 右舷
14	马达加斯加	南纬16.17度 东经 49.76度	21:17:00	20 S 69.5 E	21:21:00	8.0 S 东经 78.7度	雷暴 纳迪尔与波特

附录2表格展示

显示与图2A中的红色精灵相关的2022年4月15日检测到的闪电放电ENTLN数据。黄色高亮标出的正极云对地闪电最有可能是精灵母闪。

UTC	lat	lon	type	峰值_电流	峰值_电流_KA ic	
08:32:47.204	-21.0514	170.1377	0	77798	77.798	0
08:32:47.268	-21.1155	169.9281	0	21332	21.332	0
08:32:47.292	-20.9606	170.2124	0	-9154	-9.154	0
08:32:47.245	-21.05355	170.24808	0	-30171	-30.171	0
08:32:47.267	-21.17935	169.96044	0	-22839	-22.839	0
08:32:51.392	-27.47199	164.25869	1	-11250	-11.25	14966
08:32:51.413	-27.44847	164.55369	1	-3824	-3.824	14095
08:32:52.954	-28.16133	163.38961	1	-9750	-9.75	19320
08:32:54.700	-28.3123	162.971	0	128727	128.727	0
08:32:52.952	-28.17513	163.35322	1	-8236	-8.236	13796
08:32:55.084	-28.28163	163.2645	0	-10405	-10.405	0
08:32:54.741	-28.33185	163.15856	1	4532	4.532	12085
08:32:54.933	-28.28125	163.57713	0	-4412	-4.412	0
08:32:55.040	-28.32231	163.45128	1	-3485	-3.485	14112
08:32:55.365	-28.46071	163.33067	1	4129	4.129	18920
08:32:58.115	-27.59998	164.39785	1	-11860	-11.86	18884

参考文献

Bell, T. F.S. C. Reising, U. S. Inan,（1998年）。伴随红色精灵出现的正地闪之

Beard, B. L.（2018年）。国际空间站乘组成员工作负荷的特征分析：工作负荷对疲劳、睡眠紊乱和昼夜节律失同步的影响。NASA技术备忘录20205006969，28页。

Bjørge-Engeland, I., Østgaard, N., Mezentsev, A., Skeie, C. A., Sarria, D., Lapierre, J. 等

Blanc, E., Farges, T., Brebion, D. 等（2007年）。国际空间站上 LSO（闪电与精灵

Bonney, R., Phillips, T. B., Enck, J., Shirk, J., 和 Trautmann, N.（2014年）。公民科学与青少年教

Chanrion, O., Neubert, T., Lundgaard Rasmussen, I. 等（2019年）。国际空间站

28, doi:10.1007/s11214-019-0593-yChen, Y., Romps, D.M., Seeley, J.T. 等（2021年）

1999年）。毫秒以下分辨率的闪电电流与红色精灵发展：观测及其意义，《地

(2022年). 不同对流阶段热带雷暴云顶端蓝色电晕放电的分析。《地球物理研究

Gebelein, J. 和 Eppler, D.（2006年）国际空间站的地球遥感如何补充现有的卫星传感器。《国际遥感杂志》，27（13）：2613-2629

Goodman, S. J. 和 D. R. MacGorman，（1986年），云对地闪电活动，中尺度对流复合体。《月刊天气评论》，114，2320-2328。

Houze, R. A.（2004年），中尺度对流系统，《地球物理学评论》，42，RG4003，doi：10.1029/2004RG000150。

Liu, F., Lu, G., Neubert, T. 等（2021年）。与穿透至平流层的雷暴云中窄双极脉冲事件

Li, J., Cummer, S. A., Lyons, W. A., 和 Nelson, T. E.（2008年）。对利用高速图像和远程电磁场观测延迟红色精灵，*J. Geophys.Res.*，113，D20206，doi:

McHarg, M. G., R. L. Balthazor, B. J. McReynolds, D. H. Howe, C. J. Maloney, D.O'

Neuro：国际空间站上的事件式传感器，*Opt. Eng.* 61(8)085105，doi:10.1117/1.OE.61.8.085105 Neubert, T., Østgaard, N., Reglero, V. 等（

Doi.10.1007/s11214-019-0592-2 Neubert, T., Chanrion, O., Heumesser, M.等

Huntrieser, H.（2023年）。国际空间站对雷暴的光学观测：最新成果与展望

Phillips, TB, Ballard, HL, Lewenstein, BV, Bonney, R.（2019年），参与科学通过公民科学：超越数据收集。《科学教育》。103：665– 690。doi:10.1002/sce.21501

Qie, K, X. Qie 和 W. Tian, （2021年）。南部闪电活动呈上升趋势亚洲地区。《科学通报》， 66，1，78-84。Doi:10.1016/j.scib.2020.08.033

Robinson, J.A., Liddle, D., Evans, C., 和 Amsbury, D.（2002）宇航员获取的轨道照片作为遥感数字数据：空间分辨率。《国际遥感杂志》，23：4403-4438。

Sato, M., Mihara, M., Adachi, T., Ushio, T., Morimoto, T., Kikuchi, M., Kikuchi, H., Suzuki, M., Yamazaki, A., Takahashi, Y., 等（2016），基于 JEM-GLIMS 天底观测得出的红

Soula, S., Mlynarczyk, J., Füllekrug, M., Pineda, N., Georgis, J.-F., van der Velde, O.,

Williams, E. R. 和 Y. Yair（2006）。红色精灵产生雷暴云的微观物理与电学特性载于：《红色精灵、蓝色喷流与强烈闪电放电》，M. Fullekrug 等编，57-83，施普林格（荷兰印刷）。

Yair, Y., P. Israelevich, A. Devir, M. Moalem, C. Price, J. Joseph, Z. Levin, B. Ziv 和 A. Teller,（2004）。航天飞机上的红色精灵新观测。J. Geophys. Res., 109, 15, D15201/10.1029/2003JD004497。

Yair, Y., C. Price, Z. Levin, J. Joseph, P. Israelevitch, A. Devir, M. Moalem, B. Ziv 和 M. Asfur,（2003）。地中海以色列尘埃实验（MEIDEX）期间从航天飞机上进行的红色精灵观测。《大气、太阳和地球物理学杂志》，65，635-642。

Yair, Y., L. Rubanenko, K. Mezuman, G. Elhalel, M. Pariente, M. Glickman-Pariente, B. Ziv, Y. Takahashi 和 T. Inoue（2013）。来自国际空间站的瞬态发光事件新彩色图像。《大气、太阳和地球物理学杂志》，102，140-147。

Ziv, B., Y. Yair, K. Pressman 和 M. Fullekrug, （2004）。对航空中心中尺度对流系统全球预报的验证。《应用气象与气候学杂志》，43，720-726。