

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.03.03

月球撞击闪光观测研究进展

曹 莉^{1,2}, 王 慎^{1,3}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 国家航天局 空间碎片监测与应用中心, 北京 100101;
3. 中国科学院 空间天文与技术重点实验室, 北京 100101)

摘要: 月球撞击闪光是流星体撞击月球表面产生的闪光现象, 回顾了 20 年来月球撞击闪光观测的研究进展, 介绍了美国航空航天局 (NASA)、欧洲航天局 (ESA) 和西班牙的团队开展的监测计划, 说明各计划对观测技术、数据处理和分析技术的贡献, 并总结了主要的观测和研究成果。利用长期积累的观测数据已经能够对撞击体的大小分布和流量提供一定的限制, 但由于存在观测数据有限和撞击模型粗糙等问题, 因此必须对它们进行改进。中国在月球撞击闪光观测方面的研究还是空白, 建议开展地基和针对月球背面的监测计划, 为中国的探月工程和载人登月计划提供相关设施防护的设计依据。

关 键 词: 月球; 流星体; 撞击闪光

中图分类号: P185.82 **文献标识码:** A

1 引 言

月球撞击闪光是流星体高速撞击月球表面产生的闪光现象。小行星或彗星撞击月球表面产生的陨石坑是典型的月貌特征, 时至今日依然不断有流星体撞击到月球表面。由于月球没有大气层, 所以这些流星体在与月面发生超高速撞击之前不会被空气减速, 即使很小质量的流星体都会直接撞击到月球表面并产生闪光现象。约一个世纪前, Gordon^[1]就讨论了夜晚从地面观测到流星体撞击月球阴影区形成的闪光的可能性, 他质疑为什么从来没有报道已有人观察到这种事件, 并希望天文学家给出答案。实际上月球瞬变现象 (Lunar transient phenomenon, LTP) 中的一部分就来源于流星体撞击月球表面, 但由于大多是个别人的目视观察结果, 难以得到确认。1953 年 Stuart^[2]用照相方式观测到一次月球表面的闪光现象, 他将此归结为一个大的流星体撞击了月球表面, Buratti 和 Johnson^[3]从克莱门汀号任务 (Deep Space Program Science Experiment, DSPS) 的图像中找到了该次撞击对应的新陨石坑, 该

收稿日期: 2019-11-07; 修回日期: 2019-12-26

资助项目: 中国科学院太空应用重点实验室开放课题 (LSU-KFJJ-2018-09)

通讯作者: 王慎, shenwang@nao.ca.cn

陨石坑直径为1.5 km。1972年,阿波罗17号的宇航员哈里森·施密特(Harrison Schmitt)在月球轨道上目视观察到一次疑似的流星体撞击月球产生的闪光^[4],该流星体可能属于双子座流星雨。

Melosh等人^[5]分析认为,流星体高速撞击月球表面会产生等离子羽流和光学辐射,从地面上可以观测到直径小于1 m的流星体撞击月球产生的上述效应。Ortiz等人^[6,7]分别在1997年和1998年尝试用望远镜对月球进行观测,虽然观测到了疑似的事件,但由于是单台望远镜的CCD成像观测,所以无法区分是宇宙线、噪声还是真实的撞击闪光事件。

1999年狮子座流星暴期间,Ortiz等人申请了多台望远镜的观测时间(卡拉拉天文台的0.8 m施密特望远镜,泰德天文台的1.5 m红外望远镜和内华达山脉天文台的0.9 m望远镜),还架设了几台小型望远镜用于开展月球撞击闪光观测。由于天气和技术原因,最后只有位于蒙特雷的小型望远镜观测到了5个撞击闪光事件^[8-10],其中3个被其他观测者证实^[11]。这是首次确切地探测到月球撞击闪光事件。他们在2001年的狮子座流星雨期间也持续进行了类似的观测^[12]。

除了狮子座流星雨外,后续还观测到了来自双子座流星雨^[13]、天琴座流星雨^[14]、英仙座流星雨^[15]和金牛座流星雨^[16]的月球流星体撞击闪光事件,以及与流星雨无关的零星撞击闪光事件^[17-19]。

月球撞击闪光观测在监测地月空间流星体环境方面的优势很快显示出来,单个火流星监测相机所能监测的地球大气面积约为 10^4 km²,而单个月球撞击闪光观测相机所能监测的月表面积达到数个 10^6 km²,月球撞击闪光观测是一种更高效的流星体流量监测手段。从2005年开始针对月球撞击闪光的监测计划已被相继建立起来,主要包括2006年正式开始的NASA的月球撞击监测计划(the NASA Lunar Impact Monitoring Program)^[19],2009年开始的月球撞击探测与分析系统(Moon Impacts Detection and Analysis System, MIDAS)计划^[20]和2015年开始的近地天体撞击月球和光学瞬变(NEO Lunar Impacts and Optical Transients, NELIOTA)计划^[21]。除此之外还有一些其他的监测计划,具体内容可以从ESA于2015年组织召开的月球撞击研讨会的报告中获得^①。这些计划部署了专门的望远镜系统,开发了自动和/或远程观测、目标自动识别和数据处理分析的软件和流程,积累了一定的数据样本,并定量分析了近地空间的流星体流量。同时开展了与此相关的技术研究,包括:闪光事件的流量定标,通过地面超高速撞击实验确定撞击过程的发光效率,多波段同时观测以测量撞击闪光的温度特性,利用图像中由于地球反照照亮的月面特征确定撞击闪光在月面的位置。

第2章介绍目前国际上主要的月球撞击闪光监测计划,并进行了对比;第3章介绍目前针对月球撞击闪光主要的数据处理和分析方法;第4章介绍主要的探测成果和几例特殊的月球撞击事件;第5章分析月球撞击闪光的研究意义,并进行了总结与展望。

^①<https://www.cosmos.esa.int/web/lunar-impact-workshop/presentations>

2 主要的监测计划

目前已经开展的月球撞击闪光观测项目主要有三个, 分别是 NASA 的月球撞击监测计划、西班牙的 MIDAS 计划和 ESA 资助的 NELIOTA 计划。下面分别简要介绍这三个计划的情况。

2.1 NASA的月球撞击监测计划

NASA 于 2005 年开始“星座计划”, 该计划的目标之一是在 2020 年以前重返月球。在月球表面单次部署宇航员的停留时间将长达 6 月, 远远超过阿波罗计划, 这极大地增加了航天员和相关设施遭受流星体撞击的可能性。为此, 星座计划于 2005 年启动了流星体撞击月球闪光事件的监测, 研究流星体撞击和撞击溅射物, 以便更好地进行月球太空船、太空服和月面系统的防护设计。星座计划终止后, 月球撞击监测由流星体环境办公室 (MEO) 接管^[19]。

NASA 的月球撞击监测由马歇尔太空飞行中心的太空环境小组实施, 主要在位于马歇尔太空飞行中心的自动月球和流星观测站 (北纬 34.66°, 东经 86.66°) 开展观测。该观测站由两个天文圆顶, 一个 15 m 高的全开式屋顶的观测塔和一个运行中心组成。在 2007 年 9 月—2011 年 6 月增加了佐治亚州奇克莫加 (34.85°N, 85.31°W) 的观测站点, 通过远程控制观测设备开展监测。第三个站点是新墨西哥州的天空观测站, 观测设备是一台 355.6 mm 口径的望远镜, 主要在 2011 年 10 月—2012 年 9 月实施监测。

根据 1999 年狮子座流星雨期间对月球撞击闪光的成功观测经验, NASA 月球撞击监测计划制定了行之有效的观测策略: 使用 2 台基本相同的望远镜系统同时观测月球的阴影区, 以有效排除宇宙线和噪声产生的虚假信号; 视场大小尽可能匹配半个月球, 以覆盖尽可能大的月表面积; 终端满足低噪声、高帧频、宽波段范围, 以探测极度暗弱的事件。观测在月球阳照区约为 10% ~ 50% 之间的夜晚进行: 小于 10% 的夜晚月球仅在晨昏可见, 且地平高度角很低, 难以观测; 大于 50% 时月球阳照区引起的杂散光过于强烈, 会淹没较暗的闪光信号, 同样不适合观测。这样每个月有 5 个晚上和 5 个早晨适合观测。

除了宇宙线和噪声引起的虚假信号外, NASA 月球撞击监测计划还考虑了与人造空间目标或者地球大气内的流星混淆的可能性。大多数情况下, 这两种事件在观测视频中呈现出随时间移动的轨迹, 通过多帧比较可以剔除。但还有两种情形易与撞击闪光混淆: 1) 流星的运动完全朝向观测者时, 在多帧图像中流星的像斑都在同一个位置; 这时可以通过光变曲线的形状来判断, 流星的光变曲线的上升和下降基本对称, 而月球撞击闪光的光变曲线具有快速上升并缓慢衰减的特征。2) 卫星或碎片在某些相位角下反射太阳光产生的短暂闪光, 持续时间在一帧以内。这种情况下仅从图像数据难以与撞击闪光区分。有两种途径可剔除这种事件, 一是使用美国空军专业太空追踪网站 (space-track.org) 的数据计算观测时刻是否有卫星或空间碎片经过月球方向, 但无法排除未被编目的碎片; 二是在距离观测站 100 km 以上的地方使用望远镜进行辅助观测, 通过视差来区分事件是来自于地球轨道还是来自于月球表面。

NASA 月球撞击监测计划使用的仪器设备都是商业化产品,而非专业天文仪器,包括: Meade RCX400 (口径 355 mm) 望远镜,通过 Meade 或 Optec 0.339 的缩焦器使焦比达到 $f/2.6$ 左右,使用 StellaCam EX 或 Watec 902 H2 Ultimate 单色摄像机,这两种摄像机都使用 Sony EXview HAD CCD 科学级芯片,芯片大小为 12.7 mm,像元数为 795×496 ,帧速率达到 30 Hz。以上组合的望远镜系统视场为 $20'$,覆盖约 $4.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 月球表面面积,相当于月球表面的 12%。摄像机输出的视频信号用 Sony GV-D800 数字磁带卡片进行数字化,量化位数为 8 bit,并由火线接口发送到计算机,记录在硬盘上供后续分析。月球撞击闪光监测使用两个以上望远镜系统进行观测,对同时性要求较高,使用 GPS 为视频打时间戳来保证时间精度要求。这样的望远镜系统观测撞击闪光的极限星等约为 $R = 10.5 \text{ mag}$,通过对比较星进行统计分析,可得测光误差为 0.2 mag。

为了捕获月球撞击闪光事件,在观测时段监测视频是持续记录的,每个观测夜都会产生大量数据。虽然目视检查视频可以发现闪光事件(该计划的第一个候选体就是这样发现的),但难以保证检出效率。项目组开发了自动检出候选体的软件“LunarScan”,可以自动检索超出平均背景 3.5 倍标准偏差的像元,通过空间相关滤波定位连续 3 行以上超出的像斑作为信号。项目组还开发了“LunaCon”软件用于对候选体进行孔径测光,并发展了整套的数据分析方法,可以从摄像记录分析撞击体的光度、总动能、质量和大小,进而从长期监测数据中分析流星体的流量^[16]。从 2005 年在试观测期间获得第一个可能的候选体开始^[16],截止 2018 年 4 月,该计划共发现 435 个月球撞击闪光的候选体。Suggs 等人^[22]在 2014 年对该计划 2008—2011 年的撞击闪光观测结果进行了分析和总结,他们从 330 个候选体中挑选出包含 126 个候选体的样本进行了流星体流量的分析。为了获得更为准确的发光效率参数和了解撞击闪光的时间特性,他们还使用与监测系统相同的摄像机拍摄了地面超高速撞击试验的闪光。

2.2 西班牙的MIDAS计划

MIDAS 计划是由韦尔瓦大学 (University of Huelva, UHU) 和西班牙国家研究委员会安大路西亚天体物理研究所 (Institute of Astrophysics of Andalusia, Spanish National Research Council, IAA-CSIC) 联合实施的月球撞击闪光监测计划。该监测计划一方面是为了继续 Ortiz 等人从 20 世纪末就开始的月球撞击闪光观测研究工作^[7, 10],另外一方面是为了对撞击发光效率、陨石坑大小和位置、撞击体质量、撞击体流量和撞击体来源进行研究。

MIDAS 计划使用类似于 NASA 月球撞击监测计划的观测策略和观测设备实施监测:用小口径望远镜观测月球的阴影部分,在月球被照亮部分最多不超过 50% ~ 60% 的夜晚实施观测,避开晨昏线;至少两个望远镜同时观测;使用高灵敏度摄像机;利用图像中月球由于地球反照照亮的月表特征证认闪光发生位置。

与 NASA 月球撞击监测计划相比,MIDAS 计划的特色在于:MIDAS 计划可以与西班牙的流星雨监测网 (SPMN) 协同工作;MIDAS 的部分望远镜配置了近红外摄像机,可以实现对撞击闪光的温度测量。

MIDAS 计划分别在西班牙的三个天文台 Sevilla, La Hita 和 La Sagra 部署望远镜,也

考虑 Calar Alto 天文台在必要时参与观测。MIDAS 计划部署的望远镜系统大部分是采购的商业望远镜, 终端使用型号为 Watec 902H Ultimate 的高灵敏度 CCD 摄像机, 在 Sevilla 站还部署两台工作在近红外波段的望远镜。具体配置情况见表 1。

表 1 MIDAS 计划的主要观测仪器

观测站	Sevilla	La Hita	La Sagra
望远镜	2 台 0.36 m, 2 台 0.28 m 和 1 台 0.235 m 施密特-卡塞格林望远镜	1 台 0.41 m 施密特-牛顿式望远镜	2 台 0.36 m 施密特-卡塞格林望远镜
终端	高灵敏度 CCD 摄像机 (Watec 902H Ultimate) 和近红外摄像机	高灵敏度 CCD 摄像机 (Watec 902H Ultimate)	高灵敏度 CCD 摄像机

为了提高探测和数据处理的效率, MIDAS 团队开发了名称同为 MIDAS 的软件 (Moon Impact Detection and Analysis Software), 该软件使用 C 和 C++ 语言, 基于 Windows 操作系统, 可以实现局域网和互联网通讯, 对于 720×576 像元大小的图像处理速度可以达到 100 Hz。软件的主要功能包括图像获取 (使用模拟或者数字摄像机), 快速图像和视频的预处理, 可以针对以往观测数据进行实时月球撞击闪光证认和数据分析 (包括判定撞击体来源、测光、计算撞击体动能、计算撞击体质量、陨石坑大小和光度效率等), 同时该软件也可适用于识别太阳系中其他天体的撞击事件。MIDAS 软件在确认撞击体来源方面做了较多的工作, 具体将在第 3 章数据处理中介绍。

MIDAS 计划监测得到的候选体并没有公布在其网站上, 但从文献中可以看到, 他们在 2011—2012 年的观测季中确认了 12 例月球撞击闪光事件, 视星等为 $8.0 \sim 9.8$ mag, 撞击体的质量为 $2 \sim 165$ g^[23]; 之后还分别对英仙座^[24]、双子座^[25]和天琴座^[26]流星雨活动期间探测到的月球撞击闪光候选体进行了分析。该团队探测到了迄今公布的最亮事件 (2013 年 9 月 11 日观测到的 (2.9 ± 0.2) mag 的月球撞击闪光^[27]), 还首次实现了对月球撞击闪光的温度测量^[28]。在 2019 年 1 月 21 日的月全食期间, 该团队还探测到了一次月球撞击闪光事件^[29]。

2.3 ESA 的 NELIOTA

NELIOTA 是由 ESA 资助的月球撞击监测计划^[21, 28, 30-32]。该项目的短期目标是监测月球撞击闪光并研究撞击体和撞击的物理参数, 中期目标关注可用于空间飞行器防护设计的撞击体尺寸和撞击频率分布。与之前的月球撞击闪光监测项目相比, 由于使用了口径更大的望远镜, NELIOTA 能够探测到更暗弱的撞击闪光事件。

该项目于 2015 年 2 月在希腊雅典国立天文台启动, 通过改造该天文台的 1.2 m Kryoneri 望远镜 (北纬 $37^{\circ}58'19''$, 东经 $22^{\circ}37'07''$) 以实施观测。改造后于 2016 年 6 月 26 日开始试观测, 运行至今。近期再次获得 ESA 资助, 将运行至 2021 年 1 月。

1.2 m Kryoneri 望远镜最初是一台 1975 年投入运行的口径 1.2 m、焦比 $f/13$ 的卡塞格林式望远镜^[32]。利用原望远镜 $f/3$ 焦比的抛物面主镜, 改造成一台焦比为 $f/2.8$ 的主焦点望远镜。为开展月球撞击闪光监测, 新设计了一台主焦点双通道成像仪, 使得该项目成为目前唯一的双通道监测项目。

双通道成像仪通过分色片将入射的光学信号分为 R 和 I 两个波段, 同时成像在两台相同的科学级 CMOS 相机上。成像仪采用标准的 Johnson-Cousins R 和 I 波段滤光片, 便于进行测光定标。科学级 CMOS 相机采用 Andor 公司的 Zyla 5.5 sCMOS 相机, 使用 2×2 binning 方式工作。仪器和 Zyla 5.5 sCMOS 相机的主要性能指标如表 2 所示。

表 2 Kryoneri 望远镜改造后的主要技术指标

光学系统参数	指标	相机参数	指标
主镜口径	1200 mm	传感器类型	前照式科学级 CMOS
主镜焦比	$f/3$	像元尺寸	6.48 μm
系统焦比	$f/2.8$	快门	全局
视场	$17.0' \times 14.4'$	有效像元	1280×1280
		帧频	30 Hz
		曝光时间	23 ms

NELIOTA 采用观测疏散星团的方式以实现流量定标, 采用观测密集星场的方式以实现位置修正, 以及采用 GPS 定时的方式以实现时间测量^[31]。为捕获月球撞击闪光事件, NELIOTA 在月相为 0.1 ~ 0.45 时开展自动观测。当系统自动判断出有疑似闪光事件时, 自动保存前后共 14 帧观测图像, 然后进行人工确认。由于采用双通道同时观测的方式, 可以轻易排除宇宙线和噪声引起的虚假信号。除虚假信号外, 该项目还考虑了人造物体和地球大气内流星的影响, 剔除的方法有两种: (1) 在连续多帧图像中, 人造物体和地球大气内流星将呈现连续运动的轨迹, 而月球撞击闪光事件则不会; (2) 月球撞击闪光在相机靶面上将呈现典型的点目标 PSF 形状, 不符合该规律的事件将被排除。截至 2019 年 9 月, 该项目共发现确认的闪光事件 88 例。

2.4 监测计划的对比

从项目的目标来看, 三个计划都把研究撞击体的流量作为主要的目标, NASA 的月球撞击监测和 NELIOTA 计划更关注流星体对航天器等的潜在威胁, 而 MIDAS 更关注撞击本身, 包括撞击的发光效率、撞击坑的大小和位置、撞击体质量、撞击体来源。

从观测策略来看, 三个主要的月球撞击闪光监测计划有较多的共性, 包括: 1) 使用两个以上的望远镜或通道同时观测, 以排除噪声和宇宙线的干扰; 2) 夜晚的时候观测月球的阴影区, 在 10% ~ 50% 的月球表面被照亮的期间进行观测; 3) 望远镜的视场与半个月球的大小相匹配, 一方面增加探测效率, 另外一方面避免月球阳照区产生的杂散光的影响; 4) 利用图像中被地球反照照亮的月球表面特征实现撞击位置的确定。

NASA 的监测计划和 MIDAS 计划都以使用天文爱好者望远镜和商业高帧频摄像机为主, 为了让更多的力量加入月球撞击监测中, 流星体环境办公室还在其网站上给出了进行月球撞击监测望远镜系统所需要的最基本配置和数据处理所需要的软件 Lunarscan[®]。使用这样的望远镜系统配置虽然可以发现月球撞击闪光, 但由于系统噪声较高, 因此影响测光

[®]https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/lunar/observing_schedule.html

精度; 另外没有使用标准滤光片, 为分析闪光事件的总光能量带来了许多困难, 同时也增加了测量的不确定性。MIDAS 计划配置了近红外波段的摄像机, 同时在两个波段观测撞击闪光, 使得对闪光事件的温度测量成为可能。与上述两个计划相比, NELIOTA 计划除了使用更大口径的专业天文望远镜 (1.2 m) 外, 还更多地采用了专业天文观测的技术和方法, 包括使用科学级相机 (Andor Zyla 5.5 sCMOS) 和标准测光系统 (Johnson-Cousins R 波段和 I 波段) 等, 这样对闪光事件的视亮度测量精度更高, 同时能够实现温度测量, 避免了假设闪光温度所造成的较大不确定性。

三个计划都开发了相应的自动观测软件、数据处理和分析软件, 以支持高帧频的观测和数据处理。关于数据处理和分析的具体方法将在下一章讨论。

3 主要的数据处理和分析方法

月球撞击闪光监测的主要目的是通过长期观测数据的积累分析地月空间流星体的频率分布 (质量或大小) 和流量, 这需要将望远镜系统终端设备记录的闪光视频或图像进行处理和分析, 得到撞击体的质量/大小信息, 然后将所有候选体的质量/大小信息汇总, 整理得到频率和流量。对于较亮的撞击事件, 有可能由月球轨道详查飞行器观测到其对应的撞击坑, 因此需要从观测图像中计算出闪光的月表位置用于搜索撞击坑, 同时进行撞击坑大小的理论计算, 以便与实测值进行比较, 改进关于撞击闪光事件的相关模型、参数。不同监测计划的数据处理分析流程基本相同, 但具体方法有一定差异。下面首先介绍数据处理的基本流程, 然后重点介绍流量定标、由视星等推算总的发光能量、估计撞击温度和撞击能量, 进而估计撞击体质量/大小。最后介绍如何确定撞击坑的大小。

3.1 数据处理的基本流程

月球撞击闪光监测的图像数据处理主要采用了天文中的测光技术。总的流程为: 1) 将监测视频拆分成图像 (由于 NELIOTA 项目的终端设备为相机而不是摄像机, 可跳过此步骤); 2) 在图像中检出候选体^[33]; 3) 使用孔径测光的办法测得候选体的仪器星等; 4) 进行流量定标确定系统零点、大气消光系数和颜色改正系数等, 再将仪器星等转换为视星等; 5) 计算总的发光能量; 6) 计算撞击能量; 7) 计算撞击体质量和大小。

3.2 流量定标

各个监测计划除了观测月球的阴影区外, 还会在观测的间隙或专门安排测光夜进行流量标准星的观测, 有时也会利用出现在视场中的场星进行流量定标。对于视星等为 R 的流量标准星^[34], 可以从观测图像中测得其减去背景的积分信号 S , 假设其色指数为 $B - V$, 则可得到:

$$R = -2.5 \lg S - k'X + T(B - V) + Z_p, \quad (1)$$

其中, X 是观测标准星时的大气质量, k' 是大气消光系数, T 是颜色项, Z_p 是系统零点。当在不同天顶距测量了足够数量不同色指数的流量标准星后, 就可以将大气消光系数、颜色项和系统零点解算出来。这样对任意候选体测得其积分信号后, 就可算出其视星等。

由于大部分月球撞击闪光监测都使用白光观测, 没有滤光片, 所以其波段主要由探测器的分光量子效率决定; 而且通常只能得到一个波段的测量数据, 没有色指数信息, 因此无法使用颜色项。为此, NASA 的月球撞击监测计划用 2800 K 黑体谱与 R 滤光片和 EX-HAD 芯片的响应卷积, 得到 $R-EX$ 来代替 $T(B-V)$ 。

NASA 月球撞击计划比较了其摄像机的分光响应和 Johnson-Cousin 的波段, 认为其波段与 R 波段中心波长基本一致, 因此采用 R 星等^[22]; MIDAS 大部分望远镜系统望远镜和摄像机与 NASA 相同, 但他们使用 V 星等^[28], 在部分观测中使用了 Baader IR 带通滤光片, 此时采用 I 星等^[28]。NASA 和 MIDAS 的望远镜系统的波段与 Johnson-Cousin 的波段有较大差异, 这种差异在已知待测目标的颜色时可以较好地改正, 但遗憾的是撞击闪光的温度和色指数未知, 只能利用理论推算或实验室内超高速撞击的结果来假定, 因此带来较大误差。Suggs 等人^[34]比较了不同监测项目的流量定标技术, 发现 NASA 的月球撞击监测计划在流量定标工作上考虑得相对周全, 采用较为适宜的 R 星等, 并进行了撞击闪光和恒星颜色不同的改正。其他使用类似配置的监测计划或者采用 V 星等与系统实际相差较远, 或者没有考虑颜色改正, 都会给结果带来更大的误差。

由于 NELIOTA 计划采用了标准测光系统, 所以测光和流量定标过程可以完全依照天文的测光流程进行, 并且数据处理过程中不需要引入假设, 从而保证了数据质量^[30, 35]。

3.3 撞击温度估计

假设撞击闪光符合黑体辐射, 利用两个波段的观测信息可以估计出黑体的温度。根据文献 [31], 具体方法如下。

根据普朗克公式, 黑体的辐射为:

$$B(\lambda, T) = \frac{8hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}, \quad (2)$$

其中, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s 是普朗克常数, c 是光速, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹ 是玻尔兹曼常数, T 是闪光的温度, λ 是光子的波长。

用普朗克公式除以每个光子的能量 $E = hc/\lambda$, 得到以光子为单位的黑体辐射, 表示为:

$$L_P(\lambda, T) = \frac{8c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}. \quad (3)$$

对于每个滤光片, 闪光对应的绝对流量为:

$$f_R = \Omega L_P(R, T) \quad \text{和} \quad f_I = \Omega L_P(I, T), \quad (4)$$

其中, Ω 是常数。因为两个不同的波长 R 和 I 的观测是同时开展的, 所以闪光的仪器流量 (F_R 和 F_I) 和标准星的仪器流量 (S_R 和 S_I) 可以同时获得, 分别表示为:

$$F_R = \xi_R f_R \quad F_I = \xi_I f_I \quad ; \quad (5)$$

$$S_R = \xi_R s_R \quad S_I = \xi_I s_I \quad . \quad (6)$$

其中, 系数 ξ_R 和 ξ_I 由仪器和大气的透过率决定。

使用从文献中得到的标准星颜色 ($R - I$), 表示为:

$$R - I = -2.5 \lg \frac{S_R}{S_I} = -2.5 \lg \left(\frac{\xi_I S_R}{\xi_R S_I} \right) . \quad (7)$$

利用公式 (5) 和 (6), 可得到比值 ξ_I/ξ_R ,

$$\xi = \frac{\xi_I}{\xi_R} = \frac{S_I}{S_R} 10^{-0.4(R-I)} . \quad (8)$$

于是有

$$\frac{L_R(R, T)}{L_I(I, T)} = \xi \frac{F_R}{F_T} . \quad (9)$$

式 (9) 中唯一的未知数就是温度 T , 因此可通过式 (9) 数值解出温度 T 。由于存在测光的不确定度, 温度的不确定度会相应地受到影响。确定温度不确定度的办法是使用蒙特卡罗法, 利用测出的流量和其不确定度模拟产生图像, 然后利用上述方法计算出每次的温度, 最终统计出温度的不确定度。

3.4 计算总的发光能量

撞击闪光总的发光能量为:

$$E_{\text{lum}} = f_{\lambda} \cdot \Delta\lambda f \pi d^2 t , \quad (10)$$

其中, $f_{\lambda} = 10^{-7} \times 10^{-(R+2.11+Z_{PR})/2.5} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$, R 是候选体的视星等, $\Delta\lambda$ 是滤光片带宽, d 是观测站到月球的距离, Z_{PR} 是 R 波段的零点^[36] (为 0.55), f 是辐射立体角相关的系数, 在自由空间为 4。月球撞击辐射立体角为 2π , 所以 f 等于 2。

需要注意的是, 这里总的发光能量是指空间上的总和, 但从波段角度来看, 仅仅是观测波段范围内。

3.5 计算撞击能量

当已知发光效率 η (即撞击总能量中以电磁波辐射出去的能量比例) 时, 可以很容易计算撞击体总动能 $E_K = E_{\text{lum}}/\eta$ 。Rubio 等人^[8]给出了狮子座流星雨的发光效率, Swift 等人^[37]将超高速撞击实验结果和 Moser 等人^[14]确定的三个流星雨的发光效率相结合, 提出一个与速度相关的发光效率的模型:

$$\eta = 1.5 \times 10^{-3} e^{-(9.3/v)^2} . \quad (11)$$

其中速度 v 以 km/s 为单位。这个发光效率对应 NASA 月球撞击监测计划的望远镜系统波段内的光能量与撞击能量之比。

MIDAS 计划直接取效率值为 0.002^[27], 没有考虑撞击速度对发光效率的影响。Avdellidou 和 Vaubaillon^[35]在对 NELIOTA 计划观测到的撞击闪光事件数据进行分析时, 采用了 NASA 月球撞击监测计划提出的发光效率计算方法。为了保证光能量的波段范围与 NASA 月球撞击监测计划基本一致, 他们利用候选体的 R 星等、 I 星等和有效温度 T 计算候选体在 400 ~ 900 nm 范围内的总能量。

3.6 计算撞击体质量/尺寸

撞击总能量来源于撞击体动能的转化, 在已知撞击体速度 v 的情况下很容易计算撞击体的质量 M :

$$M = 2 E_K / v^2 . \quad (12)$$

由于月球撞击闪光监测只能观测到撞击产生的闪光, 无法观测到撞击前撞击体的运动轨迹, 所以撞击体的速度估计需要借助一定的假设。

同一流星雨中的流星体轨道相同, 而且已经有数据积累, 如果能够确定撞击体来源于哪个流星雨, 那么就可以知道其轨道, 进而计算出其撞击月球的速度。不同的监测计划发展出了不同的确定某个撞击事件是否与某个流星雨相关的方法。如果认为撞击由零星流星体造成, 无法找到对应的流星雨, 不同计划采用了不同的速度假设, 如 MIDAS^[27] 采用 17 km/s, NASA^[22] 采用 24 km/s。

计算出撞击体的质量后, 再假定密度就可以计算出撞击体大小。对于来自某个流星雨的撞击体, 可以采用该流星雨的密度数据。但如果是零星流星体, 那么根据流星体组成的不同, 密度的假设相差较大, 如铁质流星体密度约为 6 g/cm³, 石质流星体密度约为 3.4 g/cm³, 彗星体的密度则为 1 g/cm³。

3.7 撞击坑大小估计

目前为止, 监测到的两个较亮的流星体 (2013 年 3 月 17 日事件和 2013 年 9 月 11 日事件) 都由月球勘测轨道飞行器 (LRO) 观测到了对应的陨石坑。通过对比撞击坑大小的估计值和实测值, 可以在一定程度上修正发光效率等重要参数。因此撞击坑大小估计很有意义。

有两个主流的撞击坑大小估计方法, 一个是 Gault 等人^[38] 提出的关系:

$$D = 0.25 \rho_P^{1/6} \cdot \rho_t^{-0.5} \cdot E_k^{0.29} \cdot \sin^{1/3} \theta , \quad (13)$$

其中, D 是撞击坑边缘直径, ρ_P 和 ρ_t 分别是撞击体和撞击对象的密度, 撞击角度 θ 是从局部地平起量的高度角, E_k 是撞击体动能。另一个是 Holsapple 提出的公式^[39]:

$$D = 2.6 K_r \left[\frac{\pi_v M}{\rho_t} \right]^{1/3} , \quad (14)$$

其中, π_v 是三维因子:

$$\pi_v = K_1 \left[\left(\frac{ga}{(V \sin \theta)^2} \right) \left(\frac{\rho_t}{\rho_P} \right)^{\frac{6v-2-\mu}{3\mu}} + \left[K_2 \left(\frac{Y}{\rho_t (V \sin \theta)^2} \right) \left(\frac{\rho_t}{\rho_P} \right)^{\frac{6v-2}{3\mu}} \right]^{\frac{2+\mu}{2+\mu}} \right]^{\frac{-3\mu}{2+\mu}} , \quad (15)$$

其中, $K_1 = 0.2$, $K_2 = 0.75$, $K_r = 1.1$, $\mu = 0.4$, $v = 0.333$, $Y = 1000 Pa$, g 是月球表面的重力加速度 ($g = 0.162 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。参数 a 、 M 和 V 是撞击体的半径、质量和撞击速度。

4 探测成果

4.1 流星体大小频率分布

NASA 的月球撞击监测计划和 ESA 支持的 NELIOTA 计划都分析了积累的数据。

Suggs 等人^[22]回顾了 NASA 月球撞击监测计划 2006—2011 年发现的候选体, 从中抽取了 126 个在测光夜观测到的候选体组成的样本, 计算并分析了这些候选体在不同发光效率假设下的峰值光能量、动能和质量。通过对候选体 R 星等分布的分析, 认为该监测的完备星等为 9.0 mag。于是计算了 R 星等亮于 9 mag 的流星体的流量是 $1.03 \times 10^{-7} h^{-1} \cdot km^2$, 9 mag 相当于月球上能量为 $1.05 \times 10^7 J$ 的撞击。质量为 30 g 的流星体的流量为 $6.14 \times 10^{-10} m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。该结果略低于 Brown 等人^[40]根据近地天体和火球数量确定的幂律分布流量, 但还在误差范围内。

到 2018 年 11 月 NELIOTA 项目观测到的候选体已经达到 81 个, 其中 55 个同时在两个相机中被观测到。Avdellidou 和 Vaubaillon^[35]对这些候选体进行了温度、质量和大小的计算, 还进行了可能产生的陨石坑大小的分析。他们使用一个幂律公式 $N(> D) = A \cdot D^\alpha$ 来描述这些流星体的大小频率分布, 幂律谱指数 (α) 与发光效率无关, NELIOTA 项目的候选体大小频率分布幂律谱的 $\alpha = -2.28 \pm 0.08$, 与 Suggs 等人^[22]2014 年计算出的 NASA 月球撞击监测计划候选体样本的 $\alpha = -2.18 \pm 0.10$ 基本一致。

4.2 特殊撞击事件

在几个监测计划观测到的撞击事件中, 有一些事件比较特别。包括 NASA 月球撞击监测计划于 2013 年 3 月 17 日观测到的 3.0 mag 撞击闪光 (简称 20130317), MIDAS 计划于 2013 年 9 月 11 日观测到的 2.9 mag 的撞击闪光 (简称 20130911) 和 MIDAS 计划于 2019 年 1 月 21 日月全食期间观测到的撞击闪光 (简称 20190121) 事件。前两个事件分别是两个计划观测到的最亮的撞击事件, 且都由月球勘测轨道飞行器找到了对应的撞击坑, 第三个事件在月全食期间被观测到。

4.2.1 20130317 事件

NASA 的月球撞击监测计划在 2013 年 3 月 17 日 03:50:54.312 (UTC) 探测到了其 8 年监测以来最亮的撞击闪光事件, 该事件的峰值 R 星等为 (3.0 ± 0.4) mag, 对应 $7.1 \times 10^6 J$ 的发光能量, 该撞击闪光的位置在 $20.60^\circ \pm 0.17^\circ N$, $23.92^\circ \pm 0.30^\circ W$ ^[41]。该撞击体很可能来源于室女座复合流星雨, 因此可以假设其速度为 25.6 km/s, 撞击高度角为 56° 。根据这些条件可以计算出撞击的动能是 $5.4 \times 10^9 J$ 。假设月壤的密度为 $1500 kg/m^3$, 撞击体的密度在 1800 到 $3000 kg/m^3$ 之间, 那么使用 Holsapple(1993) 和 Gault (1974) 模型可以推出该次撞击产生的陨石坑的内部直径在 $9 \sim 15 m$ 之间, 边缘直径在 $12 \sim 20 m$ 之间。

月球勘测轨道飞行器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 分别在 2012 年 2 月 12 日和 2013 年 7 月 28 日对 20130317 的撞击位置进行了拍摄, 通过对比图像发现了一个新的陨石坑。该陨石坑位于 $20.7135^\circ N$, $24.3302^\circ W$, 边缘直径为 18 m (内部直径 15 m), 很有可能是 20130317 月球撞击事件产生的。这一发现一方面证明 NASA 月球撞击监测计划的流量定标过程和光度效率估计是合理的, 另外一方面为月球撞击坑溅射物研究提供了一个绝好的机会。Robinson 等人^[42]对此进行了细致的研究, 除了研究撞击坑的挖掘深度和溅射物的分布对月壤改变过程的限制外, 还提出由于撞击溅射物的速度是几十到几百米每秒, 并可以达到数十千米外的月球表面, 因此与主撞击坑相比, 溅射物对月球探测器或其他探月设施的

危害更大,在设计探月计划时须考虑这个因素。

4.2.2 20130911 事件

西班牙 MIDAS 计划中的两台望远镜(口径分别为 0.36 m 和 0.28 m)在 2013 年 9 月 11 日 20:07:28.68 (UTC) 记录到了在月面坐标 $17.2^{\circ}\pm 0.2^{\circ}\text{S}$, $20.5^{\circ}\pm 0.2^{\circ}\text{W}$ 处流星体撞击月球所产生的异常闪光。此闪光的峰值亮度达到 (2.9 ± 0.2) mag (V 星等),持续时间为 $8.3\text{ s}^{[27]}$,到目前为止该事件也是最亮和持续时间最长的月球撞击闪光事件。如果假设发光效率为 0.002,流星体撞击期间释放的能量估计为 $(15.6\pm 2.5)\times 10^3$ kgTNT 当量。由于在事件发生时刻并没有活动的主要流星雨,所以该事件可能来自零星的流星体,可以假设其速度为 17 km/s,据此估计得到的流星体质量为 (450 ± 75) kg;如果假设撞击体来自事件前两天的小型流星雨-英仙座 ϵ ,那么该流星体的速度就将是 53.2 km/s,对应的流星体质量为 (46 ± 7) kg。根据撞击坑标度公式可以求出在上述两种假设下陨石坑的直径在 46~56 m 之间。

月球勘测轨道飞行器分别在 2014 年 3 月 16 日和 4 月 13 日拍摄了对应的月球表面,通过对比以往图像,很容易发现 2013 年 9 月 11 日的撞击事件产生的新陨石坑^[43]。该陨石坑位于 17.167°S , 339.599°E ,与 MIDAS 团队公布的位置仅仅相差了 2 km。陨石坑的边缘直径为 34 m,溅射物在撞击地点周围的各个方向延伸到 500 m。

4.2.3 20190121 事件

20190121 事件并非来自于日常的夜晚观测,而是发生在 2019 年 1 月 21 日的月食期间。据记录,这次事件应当是首次被科学记录的月食期间发生的月球撞击闪光事件。

该事件被 MIDAS 计划的多台望远镜观测到,闪光持续了 0.28 s,峰值亮度等效于 4.2 mag。撞击发生在月球 $29.2\pm 0.3^{\circ}\text{S}$, $67.5\pm 0.4^{\circ}\text{W}$ 处。该事件无法找到对应的流星雨,应是一次零星流星体引发的撞击事件。在假定撞击速度为 17 km/s 的前提下,该次撞击闪光的黑体温度约为 5700 K,撞击体总动能 6.55×10^9 J,撞击体质量为 45 kg。预计产生的撞击坑边缘直径为 10~15 m。目前尚无月球轨道卫星验证结果。

20190121 撞击事件为研究者提供了新的思路,即在月全食时进行撞击闪光观测,此时整个月面都在阴影区,因此都可观测,并且杂散光也会较低,是极佳的观测时机。同时,可以考虑在月全食时,开展撞击闪光的无缝光谱观测。

5 总结和展望

5.1 月球撞击闪光观测回顾

从 1999 年 11 月 18 日第一次确认观测到月球撞击闪光事件到现在恰好是 20 年,这 20 年间月球撞击闪光观测技术有了长足的发展,同时也促进了对这种特别现象的研究,观测技术的发展主要经历了三个阶段。第一个阶段以 1999 年在狮子座流星暴期间首次确认观测到月球撞击闪光为标志,这次探测成功应归因于观测技术手段的提升。Ortiz 等人^[7, 10]在 1997 年和 1998 年的观测基础上总结了经验,将终端设备由慢速读出的 CCD 相机改为高速 CCD 摄像机,并使用多个望远镜系统进行同时观测,最终获得了普遍认可的关于月球撞击

闪光的切实观测证据。这种多望远镜同时高速摄影的观测方式一直延续至今。第二个阶段以 NASA 的月球撞击监测计划开始实施为标志。在该计划以前, 对月球撞击闪光的观测重点集中在主要的流星雨发生期间, 该计划实现了对流星撞击闪光的常规监测, 并且发展了自动观测、自动数据处理技术, 使得对于地月空间流星体大小频率和流量的统计成为可能。该计划在闪光事件的流量定标、发光效率确定等方面都做了很多基础性的工作, 在数据处理分析的全链路上都进行了优化和完善。第三阶段以 NELIOTA 计划的实施为标志。NELIOTA 计划一方面配置了较大口径的望远镜和科学级的 CMOS 相机, 使得探测深度大大增加; 另一方面采用双通道在两个不同的波段观测, 能够对闪光事件进行温度测量; 更重要的是采用了天文标准测光系统, 使得流量定标精度显著提升。随着该计划的持续实施, 一定会获得令人瞩目的研究成果。

虽然取得了上述成绩, 但是在月球撞击闪光观测研究方面还存在着很多未解决的问题, 同时在观测技术方面也有进一步改善的空间。2015年6月欧洲航天局科学支持办公室(The Scientific Support Office of ESA)在荷兰 ESTEC 举办了月球撞击研讨会, 来自7个国家9个不同机构的研究人员参与了这次研讨会, 会议对讨论的结果进行了总结^①, 列出了未解决的问题, 这些问题极具代表性, 包括:

- (1) 确定撞击闪光的持续时间;
- (2) 在计算发光效率时应使用峰值还是积分流量;
- (3) 撞击闪光的温度;
- (4) 流星体撞击的发光模型需要更新。

该研讨会还给出了对观测手段的建议, 包括: 提高帧频有益于撞击闪光探测, 使用红外摄像机需要注意的事项, 强调了流量定标、平场改正和杂散光抑制的重要性; 建议通过使用两个不同波段的摄像机或分色片实现两个波段同时观测用于温度测量; 建议进行更多的超高速撞击实验以确定发光效率与撞击体质量之间的关系。

该次研讨会后启动的 NELIOTA 计划落实了大部分的观测建议, 但以上总结对于目前的月球撞击闪光观测还同样适用, 在今后的观测系统策划时应该充分考虑这些意见和建议。

5.2 中国月球撞击闪光观测研究展望

月球撞击闪光监测对于进入地-月空间环境的小型小行星和流星体的研究非常有益: 月球由于没有大气, 其表面是极佳的各种尺寸天体碰撞的“显示器”, 单个地面火流星监测相机能覆盖的大气面积仅为 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 左右, 而月球撞击闪光监测的单台望远镜就可以覆盖数个 10^6 km^2 的月球表面。除了流星天文学方面的研究, 利用月球撞击闪光观测还可以开展超高速碰撞动力学、陨星学方面的研究; 当与月震仪、月球物质探测仪器协同工作时, 还可以进一步开展月球科学研究。

中国至今还没有开展过月球撞击闪光观测, 开展相关观测研究除了完成上述科学研究内容外, 考虑到我国载人登月计划深化论证研究工作已经在推进中^②, 有必要尽快就流星体

^①<https://www.cosmos.esa.int/web/lunar-impact-workshop/workshop-summary>

^②http://politics.gmw.cn/2019-10/28/content_33270295.htm

撞击以及撞击月球产生的溅射物对探月航天器和探月人员的威胁开展研究,为航天器和探月人员防护设计提供依据。

中国的月球撞击闪光观测可以规划针对月球正面的地基监测和针对月球背面的空基观测,以及考虑与未来探月载荷进行协同观测。

5.2.1 地基监测

中国幅员辽阔,所覆盖的经度范围与现有的月球撞击闪光监测站点经度分布没有重叠;鉴于月球撞击闪光瞬变的特性,在中国建立监测站点可以有效提升监测覆盖时间。对于中国的月球撞击闪光监测系统建立的建议如下。

(1) 在中国东部和西部地区分别设立观测站,一方面增加覆盖经度范围,另一方面两个观测站的观测可以形成互相校验,排除来自卫星或空间碎片短暂闪光造成的观测干扰。

(2) 在同一观测站同时布置约 30 cm 口径望远镜和约 1 m 口径望远镜以增加观测的动态范围,既可以探测到大量的暗弱事件,也可以保证可获得最有价值的强闪光事件的观测数据不超出系统动态范围。

(3) 配置两、三台 30 cm 小口径望远镜,每台使用不同滤光片实现 2 到 3 个波段的观测。1 m 口径望远镜配置多通道(2 到 3 个通道)成像终端,也同时实现 2 到 3 个波段的观测。建议从 ugriz 测光系统选择滤光片。

(4) 尝试使用 1 m 以上口径的望远镜对强闪光事件开展无缝光谱观测。

(5) 进一步开展地面高速撞击试验,以获取更多的撞击物理参数,如发光效率、温度、光变信息、谱线特征等。

5.2.2 月球背面的空基监测

2018 年 5 月 21 日探月工程嫦娥四号任务“鹊桥”号中继星发射升空,这是世界首颗运行于地月拉格朗日 L2 点的通信卫星。地月 L2 点的晕轨道不仅适合进行月球背面和地球之间的中继通信,也是对月球背面进行撞击闪光监测的最佳观测点。目前月球背面的撞击闪光监测尚属空白,建议在今后的探月计划中考虑在地月 L2 中继星上搭载月球撞击闪光监测设备,或者单独发射地月 L2 晕轨道的卫星用于月球撞击闪光监测。

对于有效载荷的建议包括:配置一台 2 或 3 通道成像望远镜监测撞击事件,除发现撞击事件外,可同时获得撞击的温度信息;配置一台装有无缝光谱仪的望远镜,以获取撞击事件光谱信息。通过光谱测量可获得月球和撞击体的物质成分,将研究领域扩展到月球科学。

5.2.3 与其他月球探测科学仪器的协同工作

不论地基或者空基的月球撞击闪光监测设备,与月球探测的其他科学仪器协同工作都可以获得更丰硕的科学成果。从 NASA 的经验来看,除了为类似月球勘测轨道飞行器这样的月球表面详查设备提供撞击位置以搜索新的撞击坑外,还可以与月震仪和月球物质探测仪协同工作。

(1) 与月震仪的协同工作

阿波罗计划从 1969 年 7 月到 1972 年 4 月先后在月面部署了 5 个月震观测站,除 1969 年 7 月部署的第一个观测站仅工作了 1 个月以外,其他月震仪都工作到 1977 年 9 月 30 日主

动关闭任务为止。在探测到的 12000 个长周期事件中, 有 4500 个事件得到证认, 其中有约 1700 个事件被分类为月球撞击事件^[44, 45]。未来的探月项目如果部署月震仪, 可以实现月球撞击闪光监测与月震监测的协同观测。一方面撞击闪光监测可以提供撞击事件的准确位置和发光能量, 使撞击事件成为参数已知的月震源, 增加月震探测的研究成果; 另一方面通过协同观测数据的积累, 对于撞击事件的震动数据特性有更深入了解后, 可以更精确地从月震仪探测数据中检出撞击事件, 实现全天时撞击监测。

(2) 与月球物质探测仪的协同工作

Benna 等人经研究发现, 月球撞击的冲击波足以穿透月壤干燥的上层, 使下面的水合层释放出水分子, 其释放量足以让月球大气与尘埃环境探测仪 (the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE) 产生可探测的信号^[46]。NASA 认为这项发现为将来的探索提供了潜在的资源, 并增进了我们对月球地质的过去及其持续演化的了解^①。

由于月球撞击闪光监测可以提供撞击位置信息和撞击能量信息, 与在轨的月球大气成分探测器相配合, 将使得月球表面水分布的研究成为可能。

除了与其他探月仪器设备协同工作外, 月球撞击闪光监测还可以为后续月球探测工程提供候选着陆点。流星体的高速撞击会把月球内部物质暴露出来, 月球撞击闪光监测可以提供这种新的撞击坑形成的时间和位置信息, 在后续月球着陆和巡视探测计划中, 可以考虑将着陆地点选在新的撞击坑附近, 对撞击坑进行就位探测和样本采集, 可以带来更丰富的科学探测与研究的收获。

参考文献:

- [1] Gordon J W. *Nature*, 1921, 107: 234
- [2] Stuart L H. *Strolling Astronomer*, 1956, 10(3-4): 42
- [3] Buratti B J, Johnson L L. *Icarus*, 2003, 161: 192
- [4] NASA A S P O T D. *Apollo Lunar Surface Journal*, 1972, MSC-07629(Tape 60): 2461
- [5] Melosh H J, Artemjeva N A, Golub A P, et al. *Lunar and Planetary Science Conference*, 1993, 24: 975
- [6] Beech M, Nikolova S. *Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C*, 1998, 21C: 577
- [7] Ortiz J L, Aceituno F J, Aceituno J. *A&A*, 1999, 343: L57
- [8] Bellot Rubio L R, Ortiz J L, Sada P V. *ApJ*, 2000, 542: L65
- [9] Bellot Rubio L R, Ortiz J L, Sada P V. *Earth Moon and Planets*, 2000, 82: 575
- [10] Ortiz J L, Sada P V, Bellot RUBIO L R, et al. *Nature*, 2000, 405: 921
- [11] Dunham D W, Cudnik B, Hendrix S, et al. *International Astronomical Union Circular*, 1999, 7320: 1
- [12] Ortiz J L, Quesada J A, Aceituno J, et al. *ApJ*, 2002, 576: 567
- [13] Yanagisawa M, Ikegami H, Ishida M, et al. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 2008, 43: 5169
- [14] Moser D E, Suggs R M, Swift W R, et al. *Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies*, US: NASA, 2011: 142
- [15] Yanagisawa M, Ohnishi K, Takamura Y, et al. *Icarus*, 2006, 182: 489
- [16] Cooke W J, Suggs R M, Swift W R. *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, 2006, 37: 1731

^①<https://www.nasa.gov/press-release/goddard/2019/ladee-lunar-water>

-
- [17] Cooke W J, Suggs R M, Suggs R J, et al. Lunar and Planetary Science Conference, 2007, 38: 1986
- [18] Ortiz J L, Aceituno F J, Quesada J A, et al. *Icarus*, 2006, 184: 319
- [19] Suggs R M, Cooke W J, Suggs R J, et al. *Earth Moon and Planets*, 2008, 102: 293
- [20] Madiedo J M, Trigo-Rodríguez J M, Ortiz J L, et al. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 7
- [21] Bonanos A, Liakos A, Xilouris M, et al. *Proc. SPIE*, 2016, 9911: 22
- [22] Suggs R M, Moser D E, Cooke W J, et al. *Icarus*, 2014, 238: 23
- [23] Madiedo J M, Ortiz J L, Morales N. Lunar and Planetary Science Conference, 2013, 44: 1778
- [24] Madiedo J M, Ortiz J L, Organero F, et al. *A&A*, 2015, 577: 118
- [25] Ortiz J L, Madiedo J M, Morales N, et al. *MNRAS*, 2015, 454: 344
- [26] Madiedo J M, Ortiz J L, Morales N, et al. Lunar and Planetary Science Conference, 2016, 47: 1124
- [27] Madiedo J M, Ortiz J L, Morales N, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 2364
- [28] Madiedo J M, Ortiz J L, Morales N. *MNRAS*, 2018, 480: 5010
- [29] Madiedo J M, Ortiz J L, Morales N, et al. *MNRAS*, 2019, 486: 3380
- [30] Bonanos A Z, Avdellidou C, Liakos A, et al. *A&A*, 2018, 612: 76
- [31] Liakos A, Bonanos A, Xilouris E, et al. arXiv e-prints, 2019: arXiv:1901.11414
- [32] Xilouris E M, Bonanos A Z, Bellas-Velidis I, et al. *A&A*, 2018, 619: 141
- [33] Swift W, Suggs R, Cooke B. *Earth Moon and Planets*, 2008, 102: 299
- [34] Suggs R M, Ehlert S R, Moser D E. *Planetary and Space Science*, 2017, 143: 225
- [35] Avdellidou C, Vaubaillon J. *MNRAS*, 2019, 484: 5212
- [36] Bessell M S, Castelli F, Plez B. *A&A*, 1998, 333: 231
- [37] Swift W R, Moser D E, Suggs R M, et al. *Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies*, US: NASA, 2011: 125
- [38] Gault D E, Quaide W L, Oberbeck V R. *A Primer in Lunar Geology*, US: NASA, 1974: 177
- [39] Holsapple K A. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21: 333
- [40] Brown P, Spalding R E, ReVelle D O, et al. *Nature*, 2002, 420: 294
- [41] Moser D, Suggs R, Suggs R J. *Asteroids, Comets, Meteors*, 2014, 2014: 365
- [42] Robinson M S, Boyd A K, Denevi B W, et al. *Icarus*, 2015, 252: 229
- [43] Madiedo J M, Ortiz J L. *Encyclopedia of Lunar Science*. Cham: Springer, 2018: 1
- [44] Nakamura Y, Latham G V, Dorman H J. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1980, 21: 218
- [45] Nakamura Y, Latham G V, Dorman H J. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 1982, 87: 117
- [46] Benna M, Hurley D M, Stubbs T J, et al. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 333

The Lunar Impact Flash Observations and Research

CAO Li^{1,2}, WANG Shen^{1,3}

(1. National Observatories of China, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Space Debris Observation and Data Application Center, China National Space Administration, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory for Space Astronomy and technology of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: It was confirmed that impacts of meteoroids on the Moon would cause detectable optical flashes. Lunar impact monitoring is critical to determine the size frequency distribution of meteoroids, the probability of collisions with the Earth, and to define the impact ejecta environment for the future in-situ Lunar exploration. The meteor astronomy, hypervelocity impact physics, cratering and other related research domain can also be benefited by this research. The progress over the last decades was reviewed, mainly focus on monitoring programs from NASA, ESA and Spain. These programs developed the corresponding observation technologies, data processing and analysis techniques. Their long-term observational data allows the size frequency distribution and the flux for meteoroids being determined. However there are still some open issues due to limited observational data and rough models. Since the lunar impact flash monitoring is not yet implemented in China, it is recommended that the ground base and the lunar far-side plan should be developed for the shield design for the China's lunar exploration programs. The monitoring programs will make maximized scientific returns by working with other lunar explore instruments.

Key words: Meteoroid; Lunar; Impact flash