中国科学 : 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 10 期 : 109519
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评述 环月低频射电天文台(鸿蒙计划)专题

# 恒星耀发与地外智慧生命

陈训舟[1,2†], 陶振钊[3,4†], 周芸帆[1,2], 陈豪燃[1,2], 岳斌[5], 张巨勇[1,2], 田海俊[1,2*], 杨晓峰[6*], 张同杰[4*]

1. 杭州电子科技大学理学院, 杭州 310018
2. 国家天文科学数据中心之江分中心, 杭州 310018
3. 德州学院计算机与信息学院, 德州 253023
4. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875
5. 中国科学院国家天文台, 北京 100012
6. 河南大学物理与电子学院, 开封 475004

*联系人, 田海俊, E-mail: hjtian@hdu.edu.cn; 杨晓峰, E-mail: xfyang@henu.edu.cn; 张同杰, E-mail: tjzhang@bnu.edu.cn
†同等贡献

收稿日期: 2026-01-10; 接受日期: 2026-03-31; 网络出版日期: 2026-09-14
太空探源专项(编号: GJ11010405)、国家自然科学基金(编号: 12373033, 12403037)、浙江省自然科学基金(编号: ZCLZ25A0301)、平方公里阵列射电望远镜(SKA)专项资助(编号: 2022SKA0110200, 2022SKA0110203)和山东省自然科学基金(编号: ZR2024QA180)资助

**摘要** 随着深空探测与地外文明搜寻(Search for Extraterrestrial Intelligence, SETI)进入新阶段, 恒星耀发与类地行星宜居性的交叉研究已成为天体物理与天体生物学的前沿课题. 恒星耀发是恒星磁活动最为剧烈的爆发性现象, 涉及非热粒子加速、磁能释放及多波段辐射, 对理解恒星磁发电机制及其演化具有关键价值. 然而, 0.1–30 MHz的极低频射电波段长期缺乏系统监测, 严重限制了对耀发中非热粒子加速及磁重联早期过程的研究. 与此同时, SETI射电信号搜寻亦受地面电磁干扰和频段覆盖不足的制约, 亟需具备长期、洁净观测环境的设施. 在此背景下, “鸿蒙计划”旨在填补该极低频射电波段的长期观测空白, 计划在月球轨道部署低频射电观测阵列. 凭借月球背面的天然电磁屏蔽优势, 该计划将联合光学、紫外与X射线等多波段数据, 对M, K型及年轻恒星开展系统耀发监测, 构建“磁发电机制-自转-耀发”演化模型, 深化对恒星磁活动的理解, 并通过低频射电观测约束耀发中的非热粒子过程, 辅助评估行星大气逃逸速率, 建立M型恒星的辐射标定关系. 此外, 由于其所覆盖频段与地球无线通信频率重合, 且在月背可实现全天域低频射电监测并显著抑制地面干扰, “鸿蒙计划”也为探测可能源自地外智慧生命的窄带或调制脉冲信号提供了理想窗口. SETI作为其重要拓展目标, 将通过长期频谱积累实现机遇性发现, 为探索地外智慧生命开辟新路径.

**关键词** 恒星活动, 系外行星系统, 射电天文

**PACS:** 97.10.Jb, 97.82.-j, 95.85.Bh

**引用格式:** 陈训舟, 陶振钊, 周芸帆, 等. 恒星耀发与地外智慧生命. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 109519
Chen X Z, Tao Z Z, Zhou Y F, et al. Stellar flares and extraterrestrial intelligence (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 109519, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0018

© 2026 《中国科学》杂志社

## 1 面向恒星耀发监测的协同观测与多波段研究

在迈向深空探测和宇宙生命探索的新纪元中, 恒星耀发与地外智慧生命的研究成为现代天体物理和天体生物学的两大核心课题. 恒星耀发是恒星磁活动最为剧烈与突发性的表现形式, 涉及高能粒子加速、强辐射释放与等离子体动力学过程, 是理解恒星内部磁发电机制与活动演化不可或缺的观测窗口. 系统监测耀发事件的时空分布、多波段特性及其对周边环境的影响, 将极大推动我们对恒星磁层结构与能量释放机制的理论建构. 与此同时, 地外智慧生命的搜寻正面临频段覆盖不足与人为干扰背景严重的双重挑战, 尤其在低频射电窄带信号探测方面, 亟需具备清洁观测环境的长期监测设施.

虽然目前针对<30 MHz频段的恒星耀发观测研究仍几乎为空白, 但是近年来国际上在空间低频射电天文学中对太阳的观测已有初步进展. 在极低频($f$ < 40 MHz)范围内, 太阳射电爆发、行星射电爆发以及快速射电暴等现象具有重要的观测价值, 同时该频段对地球中高层大气及行星磁层和等离子体的辐射特性研究也十分关键. 例如, 中国新疆天文台奇台站于2021年建成的新型低频射电阵列[1]覆盖1–90 MHz频段, 灵敏度达–78 dBm/125 kHz, 动态范围72 dB, 可实现全天候无人值守观测, 并在试运行中探测到多次太阳射电爆发, 为地面与空间联合观测极低频射电天文学提供了潜在价值; 同时, 中国“龙江-2”[2]月球轨道卫星搭载的低频干涉仪与光谱仪(Low-frequency Interferometer and Spectrometer, LFIS)也已完成在轨调试, 其首次过渡观测显示月球轨道能提供接近无干扰的极低频观测环境, 为未来太阳及恒星低频射电研究提供了新的实验基础和参考数据[1,2]. 在此背景下, “鸿蒙计划”聚焦于极低频射电波段(0.1–30 MHz)的系统性空白, 作为现有观测体系的重要补充, 拟在月球轨道部署环月低频射电干涉阵列, 利用其全天域覆盖与电磁干扰抑制优势, 长期开展恒星耀发的低频射电统计观测与SETI信号的机遇性搜索. 该计划将与紫外、X射线等平台协同, 延展耀发频谱的低能侧观测, 有望推动恒星磁活动建模、行星系统空间环境评估与智慧生命探测的融合发展, 构建面向恒星-行星系统的新一代综合观测框架.

恒星耀发(Stellar Flare)是恒星磁场重联驱动的剧烈能量释放事件, 是恒星磁活动中最显著且爆发性最强的表现形式之一[3]. 耀发过程中, 非热粒子被加速, 等离子体剧烈加热, 并释放涵盖射电、光学、紫外、极紫外至X射线的多波段辐射. 太阳耀发为该现象的典型代表, 其中以1859年卡林顿事件最为著名, 该事件引发的日冕物质抛射导致地磁风暴, 甚至影响当时的电报系统[4]. 太阳耀发能量约为$10^{29}$–$10^{32}$ erg, 持续数分钟, 基本符合日冕磁重联理论. 相比之下, M型红矮星及快速自转的年轻恒星则常见能量高达$10^{33}$–$10^{38}$ erg的超级耀发[5,6], 不仅更强大还更频繁, 尤以年轻恒星阶段显著.

耀发在光学波段通常表现为温度约9000–10000 K的黑体辐射[7,8], 但太阳耀发的光学温度仍存在争议, 有研究指出约6000–9000 K不等[9,10], 近紫外波段常见过量辐射, 提示存在额外辐射机制[10,11]. 借助Kepler, K2和TESS等空间望远镜提供的高精度光变曲线, 学界已系统统计了大量耀发事件, 构建了耀发频率分布(Flare Frequency Distribution, FFD)模型, 揭示不同恒星类型的耀发行为特征[12–16].

尽管高能、可见光等波段观测数据丰富, 但0.1–30 MHz的极低频射电波段还长期缺乏系统监测. 该频段辐射主要来源于非热电子和环磁层不稳定过程, 是诊断磁重联效率及粒子加速机制的关键窗口. 然而地球电离层对低于30 MHz的射电波存在强烈屏蔽, 且人造射频干扰频繁, 地面望远镜难以开展有效观测. 尽管国际设施如LOFAR, LWA能覆盖30–80 MHz, 但对更低频射电波段尚无充分覆盖. 这一缺口限制了耀发能量闭合分析和辐射机制建模, 影响多波段联动研究的完整性, 尤其在评估耀发对类地行星大气逃逸和空间天气影响方面显得尤为明显.

为填补该空白, “鸿蒙计划”拟在月球轨道部署0.1–30 MHz极低频射电阵列, 借助月球电磁屏蔽环境绕过地球电离层和人造干扰限制, 实现对恒星极低频射电耀发的系统补充观测. 项目将采用母星-子星分布式阵列结构, 结合高时间与频谱分辨率及大视场持续监测, 重点对M型星、K型星及年轻恒星开展长期观测, 补充现有多波段数据, 推动耀发辐射机制的系统研究. 通过与光学、紫外、X射线等多平台协同, “鸿蒙计划”有望完善恒星耀发的多波段观测体系, 深化对恒星磁活动演化及其对类地行星环境影响的理解.

基于上述背景, 本节将依次展开以下三大主题: 恒星磁活动的耦合演化机制、耀发对行星系统空间环境的影响以及多波段耀发辐射机制的协同解析.

### 1.1 恒星磁活动演化

耀发作为磁重联过程的直接产物, 是衡量恒星磁活动强度及其演化趋势的关键指标之一[3], 而恒星磁活动与自转密切相关. 恒星通过磁化恒星风持续失去角动量, 导致自转减缓和磁发电效率下降, 进而引发磁活动的系统性衰退. Rossby数($Ro = P_{\rm rot}/\tau_c$, 其中$P_{\rm rot}$为自转周期, $\tau_c$为对流周转时间)有效刻画了自转与对流耦合强度, 是描述磁发电机制效率的关键参数. Skumanich等人最早提出了恒星年龄、自转和磁活动之间的经验关系("年龄-自转-活动"关系), 这一框架已被大量后续观测研究所证实[17], 适用于从F型至M型的晚型主序星, 可通过多种磁活动指标加以刻画. 一般而言, 快速自转(小Rossby数)的恒星处于"饱和区", 表现出恒定而高效的磁活动水平, 可用$L_X/L_{\rm bol}$ (X射线光度占总辐射光度的比值)或H$\alpha$辐射比刻画, 典型值分别在$10^{-3}$与$10^{-4}$量级[18–21]. 随着自转减慢, 磁活动呈幂律衰减, 通常可表示为$L_X/L_{\rm bol} \propto Ro^{\beta}$, 其中$\beta$为观测上测得的幂律指数. 已有研究表明该指数一般在−2–−3之间, 例如对824颗太阳型和晚型恒星的统计分析得到$\beta \approx -2.7$[19], 同时存在"超饱和区"现象(图1).

尽管整体趋势明确, 不同恒星间磁活动水平还存在显著差异. 例如, 太阳在其11年活动周期中$L_X/L_{\rm bol}$从约$5\times10^{-8}$变至$5\times10^{-7}$[22,23], 而即使是M型矮星中活动较弱的恒星, 其典型$L_X/L_{\rm bol}$也可达到~$10^{-6}$[21,24].

多波段观测技术, 如X射线[19]、紫外[25]、Zeeman-Doppler成像[26]及H$\alpha$辐射[27], 被广泛用于追踪恒星磁活动演化. 耀发因其爆发性强且光变明显, 成为研究磁活动的重要工具. 耀发频率分布可用于统计分析耀发发生率与能量分布, 反映恒星磁活动的总体水平与演化趋势. 具体研究显示, G, K, M型恒星的耀发活动率随自转周期增长而明显下降, 表明磁活动随年龄增长而衰退[28]. 然而, 耀发的能量分布斜率在不同年龄段间变化不显著, 提示耀发能量释放机制在整体磁活动衰减背景下保持稳定性[12]. Ilin等人[13,14]利用TESS与K2数据研究年轻星团中的K, M型恒星, 也发现耀发活性随年龄增长而下降, 且较大质量恒星呈现更陡峭的衰减趋势. Paudel等人[29]对K2中M6-L0型恒星的分析也表明, 年轻恒星普遍具有更高的耀发活性. 不同研究均表明, 耀发能量分布斜率随年龄变化不大, 提示能量释放机制的相对稳定性[12]. 这一系列研究支持了"磁发电机制-自转-耀发"三者的耦合反馈模型[30–32], 为磁活动演化提供了理论基础.

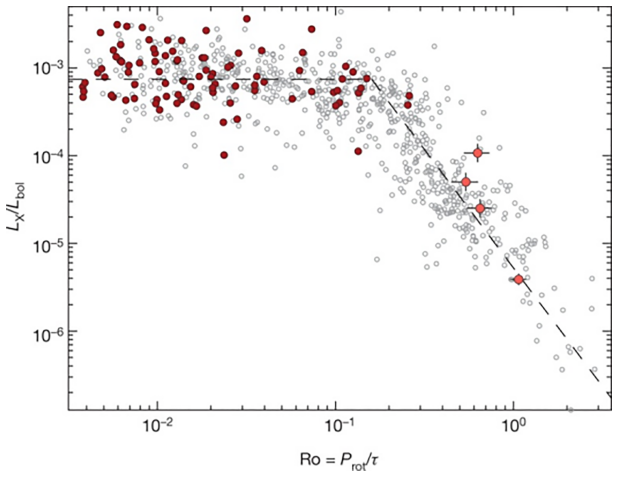



**图 1** X射线辐射分数$L_X/L_{\rm bol}$与Rossby数$Ro$的关系, 展示部分对流与完全对流恒星的旋转-活动关系. 图片来自文献[21], 已获得授权

**Figure 1** X-ray luminosity fraction $L_X/L_{\rm bol}$ as a function of Rossby number $Ro$, showing the rotation-activity relation for partially convective and fully convective stars. Reprinted from ref. [21], with the permission of Springer Nature.

当前研究主要依赖光学、紫外及X射线波段, 侧重高温等离子体的响应; 而对磁重联初期能量释放及非热粒子过程的认识仍较有限. 为深入理解磁活动的微观物理机制, 亟需拓展观测维度, 捕捉耀发早期及非热粒子主导的辐射特征. 基于此背景, "鸿蒙计划"提出在月球轨道部署极低频射电阵列, 作为多波段观测体系的重要补充, 聚焦已知耀发目标的极低频射电辐射监测, 助力填补观测空白, 深化对耀发非热物理机制的理解.

#### 1.1.1 探测极低频射电耀发活动

尽管光学、紫外和X射线波段已有丰富观测并构建成熟的耀发频率分布模型, 但受制于地球电离层对30 MHz以下射电波的屏蔽和地面无线电干扰, 0.1–30 MHz极低频射电波段的恒星耀发观测还几乎空白(见图2).

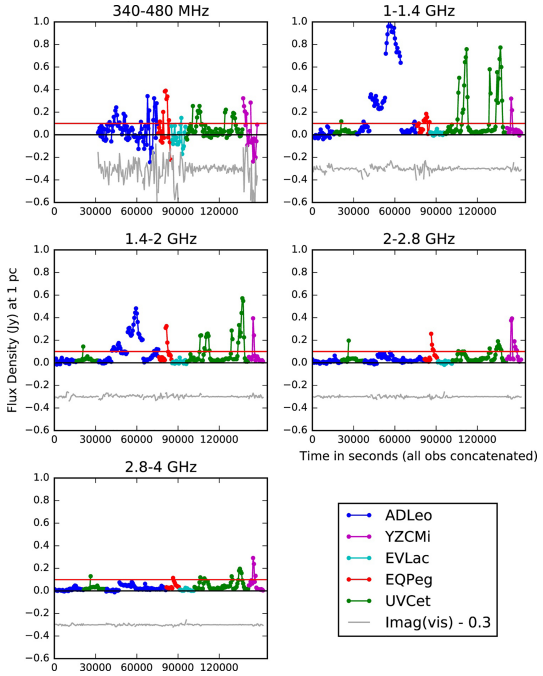



**图 2** 归一化至1 pc的Stokes I通量密度时间序列, 展示多个射电源在不同频段的观测及其可见性特征. 红线表示恒星相干射电爆发的100 mJy探测阈值. 图片来自文献[33], 已获得授权

**Figure 2** Time series of Stokes I flux densities (normalized to 1 pc), illustrating multi-frequency observations and source visibility. The red line indicates the 100 mJy detection threshold for stellar coherent radio bursts. Reprinted from ref. [33], with the permission of American Astronomical Society.

在Kepler卫星的系统性耀发事件普查中, 共识别出约$8.5\times10^5$次耀发事件, 覆盖了约1.9%的主序星, 耀发事件的平均总能量约为$10^{35}$ erg [12]. 射电波段的辐射通常仅占耀发总能量的百万分之一($10^{-6}$) [3], 据此可估算单次耀发在整个射电波段(覆盖MHz–GHz频段)释放的总能量为~$10^{29}$ erg.

“鸿蒙计划”的观测频段为0.1–30 MHz, 取典型有效带宽$\Delta\nu = 10$ MHz. 射电辐射在宽频段内通常呈幂律分布, 因此需要考虑其频谱结构. 假设射电辐射满足幂律谱$F_\nu \propto \nu^{-\alpha_{\rm radio}}$, 取典型值$\alpha_{\rm radio} = 1.0$, 并假设射电辐射覆盖范围为$\nu_{\rm min} = 10$ MHz至$\nu_{\rm max} = 10$ GHz. 取代表频率$\nu_0 = 10$ MHz, 则落在带宽$\Delta\nu$内的能量比例可表示为

$$f = \frac{\int_{\nu_0}^{\nu_0+\Delta\nu} \frac{1}{\nu}{\rm d}\nu}{\int_{\nu_{\rm min}}^{\nu_{\rm max}} \frac{1}{\nu}{\rm d}\nu} = \frac{\ln\frac{\nu_0+\Delta\nu}{\nu_0}}{\ln\frac{\nu_{\rm max}}{\nu_{\rm min}}} \approx 0.1.$$

因此, 约10%的射电辐射能量集中在10 MHz带宽内.

耀发持续时间取典型时标$\tau = 300$ s, 则鸿蒙观测频段内的射电谱亮度可估算为

$$L_\nu = \frac{E_{\rm radio} f}{\tau\Delta\nu} = \frac{10^{29}\times0.10}{300\times10^7} = 3.33\times10^{18}\ {\rm erg\ s^{-1}\ Hz^{-1}}.$$

根据“鸿蒙计划”技术指标, 低频干涉成像谱仪在30、1 MHz带宽, 10 min积分时间条件下的亮温灵敏度优于1000 K. 利用亮温与通量密度之间的关系换算, 并考虑耀发观测采用10 MHz带宽和300 s典型持续时间, 保守估计点源探测灵敏度极限约为$S_{\rm lim} \sim 10$ mJy. 如图3中绿色曲线所示, 在该灵敏度条件下, 对应射电耀发的最大可探测距离为

$$d = \sqrt{\frac{L_\nu}{4\pi S_{\rm lim}}} \approx 5.3\times10^2\ {\rm pc}.$$

根据太阳邻域的恒星数密度估算(约0.0984 pc$^{-3}$, 包含白矮星, 但不包括褐矮星、中子星及黑洞[1]), 在$d \simeq 530$ pc范围内(近似均匀分布假设下)主序星总数约为$6.1\times10^7$ 颗. 参照Kepler统计结果, 约1.9%的主序星存在耀发活动, 则该体积内的耀发主序星数量

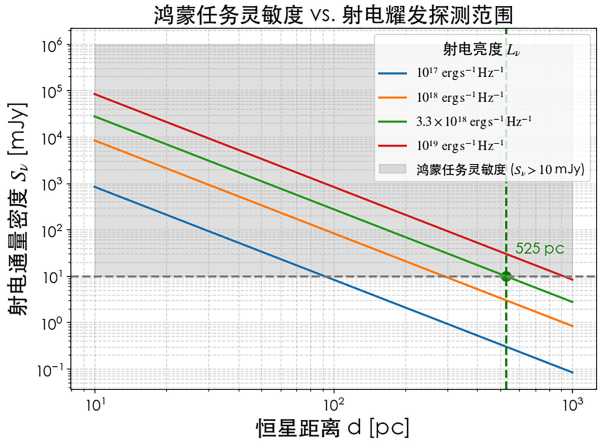



**图 3** 不同谱亮度$L_\nu$的恒星射电耀发通量密度随距离变化关系. 灰色区域表示“鸿蒙”任务的10 mJy探测灵敏度范围($S_\nu > 10$ mJy). 绿色竖线标示当$L_\nu = 3.3\times10^{18}$ erg s$^{-1}$ Hz$^{-1}$时对应的最大探测距离, 约为$5.3\times10^2$ pc

**Figure 3** Flux density of stellar radio flares as a function of distance for different spectral luminosities $L_\nu$. The gray shaded region represents the detection sensitivity of the Hongmeng mission ($S_\nu > 10$ mJy). The green vertical line marks the maximum detectable distance for a flare with $L_\nu = 3.3\times10^{18}$ erg s$^{-1}$ Hz$^{-1}$, which is approximately $5.3\times10^2$ pc.

1) https://www.pas.rochester.edu/~emamajek/memo_star_dens.html.

约为$1.2 \times 10^6$颗. 若保守估计每颗耀发星平均每年产生10次可探测的射电耀发事件, 则在理想情况下(即假设目标持续覆盖且触发/筛选效率接近100%), 理论上每年可获得的耀发事件数可达~$10^7$次. 需要指出的是, 上述估算对应理论上限. 在实际观测中, 受限于月球遮挡导致的有效观测视场、时间覆盖率以及瞬变候选体筛选与一致性检验等因素, 有效事件率将显著低于该上限. 此外, 实际探测到的耀发事件仍需结合多波段联合观测进行确认, 以排除射电干扰和背景源的影响.

依托环月轨道优越的射电环境, “鸿蒙计划”将开展针对主序星的持续极低频射电监测, 观测对象覆盖多种光谱型恒星, 以刻画耀发在主序星中的普遍性. 在此基础上, 项目将优先选择磁活动更强、耀发更频繁的M, K型及快速自转的年轻恒星作为重点目标进行高灵敏度、长时基观测. 该计划弥补了地面及空间观测在0.1–30 MHz波段的空白, 为揭示耀发中非热电子的辐射机制与磁活动演化提供关键观测数据.

### 1.1.2 构建多波段磁活动演化模型

在极低频射电耀发特征揭示了磁重联早期过程之后, 下一步应将各波段的观测结果整合, 建立系统性的磁活动演化模型. 恒星磁活动效率随自转速率和对流区结构变化而演化, 主序星随着角动量逐步流失, Rossby数增大, 磁活动由“饱和区”向“衰减区”转变. 尽管现有研究基于X 射线、Ca II H&K和H$\alpha$波段构建了磁活动-Rossby数关系, 极低频射电波段还缺乏系统研究.

“鸿蒙计划”将结合Kepler、TESS (光学)、GALEX (紫外)及Chandra/XMM-Newton (X射线)多波段数据, 填补极低频射电耀发观测空白, 构建覆盖“光学-紫外-X射线-低频射电”的恒星磁活动协同分析体系. 通过统计分析极低频射电耀发特征, 有望推动首次对射电波段不同Rossby数区间磁活动表现的系统研究, 助力明确“射电饱和区”与“射电超饱和区”的边界. 耀发偏振度、频率漂移等参数将为粒子加速与磁环结构演化提供关键时域诊断.

图4展示了该研究体系的整体框架. 模型以恒星自转周期、Rossby数和质量为输入, 输出耀发率、辐射能量及谱型等指标. 多波段观测数据在时间分辨率、辐射机制与物理深度上的互补, 显著提升模型准确性与解释力. 此框架凸显“鸿蒙计划”作为极低频射电波段观测的关键补充, 在推动磁活动研究范式转变中发挥重要作用, 同时为星-行星相互作用及宜居性演化提供理论与观测基础.

“鸿蒙计划”将在现有磁活动研究基础上, 作为多波段体系中极低频射电观测的关键补充, 弥补极低频射电观测空白, 助力“磁发电机制-自转-耀发”模型从经验关联向物理建模的转变.

### 1.1.3 捕捉极端耀发事件

超级耀发(Superflare)是恒星磁能剧烈释放的极端事件, 伴随强烈高能辐射和等离子体抛射. 在0.1–30 MHz的极低频射电波段, 耀发表现出高度偏振、亚秒脉冲、快速频率漂移及频带分裂等丰富非热结构特征, 反映了非热粒子的加速与传播过程.

这些射电特征主要源自以下物理机制: 首先, 耀发期间由磁重联驱动的非热电子束在恒星大气中传播, 激发局域等离子体密度波(Langmuir波), 后者通过非线性过程(如波模耦合)转换为可观测的电磁辐射, 即所谓的等离子体辐射. 非热电子在密度梯度中传播, 发射频率随时间迅速降低, 导致射电信号在频谱图上呈现明显的“下漂”轨迹, 形成典型的漂移暴结构[34].

其次, 在低频射电波段, 辐射过程本身具备强烈的模态选择性, 辐射信号常表现出显著的偏振特征. 尤其在磁场引导的传播路径中, 回旋激发过程或波模

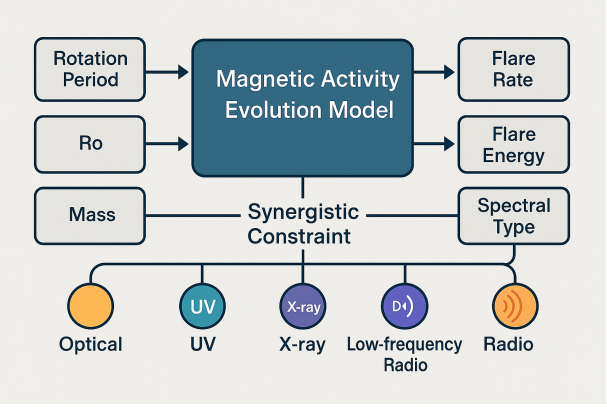



**图 4** 多波段协同约束的恒星磁活动演化模型框架, 输入恒星参数, 输出耀发率、能量与谱型等关键指标

**Figure 4** Framework of a multi-wavelength constrained stellar magnetic activity evolution model, linking stellar inputs to flare rate, energy, and spectral type.

转换不完全等效应将导致圆偏振率高达100%的单一模式辐射. 这种现象在太阳和恒星耀发的Type III型事件中广泛存在[35].

第三, 频带分裂(Band-splitting)是等离子体发射在不同密度壳层间产生的双频结构, 常出现在跃迁区密度或磁场突变位置. 其机制可能包括发射源处存在上、下电子密度界面, 或者电磁波在O-mode与X-mode之间的模态混合导致的分裂现象. 这种结构性特征为分析等离子体密度剖面和磁场梯度提供了独特的诊断窗口[36].

因此, 极低频射电波段观测的爆发性射电特征不仅反映耀发中非热粒子的动态过程, 还为反演局域磁场强度、电子能谱及等离子体微观结构提供了重要观测证据. “鸿蒙计划”覆盖0.1–30 MHz频段, 作为极低频射电观测的重要补充, 具备在极端耀发机制研究中的独特优势.

耀发期间, 非热电子在局部磁场中回旋加速, 主要激发以下低频射电辐射机制.

(1) 等离子体辐射: 快速电子束穿过高密度等离子体, 诱发Langmuir波, 并通过非线性波模耦合转换为射电波, 主频由等离子体频率$\nu_{\rm pe}$及其谐波决定.

(2) 非热轫致辐射(Nonthermal Bremsstrahlung): 高能电子与离子非弹性碰撞产生宽频连续射电辐射.

(3) 回旋辐射与回旋同步辐射(Cyclotron and Gyrosynchrotron Radiation): 电子在磁场中螺旋运动产生, 辐射频率受电子回旋频率$\nu_{\rm ce}$约束.

两个关键等离子体频率控制观测信号特性:

$$\begin{aligned}\nu_{\rm pe} &= \sqrt{\frac{n_e e^2}{\pi m_e}},\\ \nu_{\rm ce} &= \frac{eB}{2\pi m_e c},\end{aligned} \tag{1}$$

其中, $e$为电子电荷, $m_e$为电子质量, $B$为局部磁场强度, $n_e$为等离子体电子数密度. $\nu_{\rm pe}$是电子自然振荡频率, 决定辐射在等离子体中的传播条件. 等离子体辐射通常在$\nu \approx \nu_{\rm pe}$或其整数倍(如$2\nu_{\rm pe}$)发生, 观测频率可用于反演电子密度:

$$n_e\ [\mathrm{cm^{-3}}] \approx 1.24\times 10^6 \left(\frac{f_{\rm pe}}{10\ \mathrm{MHz}}\right)^2. \tag{2}$$

结合频率漂移率$\mathrm{d}f/\mathrm{d}t$, 可推断电子束沿密度梯度传播的速度和方向, 进而揭示等离子体垂直密度结构$n_e(h)$. 漂移暴中, 频率迅速下降对应高能电子在递减密度中传播路径. 配合偏振率、调制周期等多参数观测, “鸿蒙计划”将为恒星耀发区磁场拓扑、等离子体尺度及磁能释放过程提供系统化的时频结构诊断.

$\nu_{\rm ce}$表征带电粒子在磁场中回旋运动的本征频率, 对辐射的偏振特性具有决定性影响, 尤其适用于诊断低谐波回旋辐射的发射机制. 在该情形下, 若观测到的辐射频率为$f_{\rm obs}$, 且回旋谐波阶数为$s$ (常取$s = 1$或2), 则局部磁场强度可由下式估算:

$$B\ [\mathrm{G}] \approx 3.57\times 10^{-1} f_{\rm obs}\ (f_{\rm obs}\ \text{in MHz}). \tag{3}$$

结合偏振信息, 可判断电磁波的传播模式(O-mode或X-mode), 揭示磁场方向及辐射路径.

综上, 等离子体频率与电子回旋频率的联合约束为恒星耀发物理环境提供了重要的诊断工具. 其中, 等离子体频率主要用于反演耀发区的电子密度结构, 而电子回旋频率关系在观测到低谐波回旋辐射或电子回旋脉泽辐射(Electron Cyclotron Maser, ECM)等情形时可用于估算局部磁场强度. 需要注意的是, 在0.1–30 MHz频段, 恒星耀发的主要射电辐射机制为等离子体辐射. 电子回旋辐射和回旋同步辐射虽然可能存在, 但是贡献较弱, 观测信号主要由等离子体辐射主导. 本研究仍完整列举各种可能机制, 以反映耀发中非热电子与磁场相互作用的全貌.

“鸿蒙计划”利用环月轨道极低频射电观测优势, 避开地球电离层屏蔽和地面干扰, 实现0.1–30 MHz全波段覆盖, 并配备高时间分辨率(优于~10 ms)和高光谱精度(≥8192频点), 能够捕捉等离子体辐射的典型时频结构, 并通过频率漂移率、偏振度等多参数对不同辐射机制进行区分与分析. 这一策略与太阳II/III型射电暴及地球、土星千米波研究方法类似, 通过避开强背景辐射, 实现对主要辐射机制的诊断, 为恒星磁活动物理环境提供可靠观测依据[37,38].

## 1.2 系外行星宜居性

恒星耀发活动不仅反映其磁场结构与演化状态, 还深刻影响行星系统的空间环境, 尤其决定类地行星大气的稳定性与宜居性. 在耀发过程中, 恒星释放大量极紫外(Extreme Ultra-violet, XUV, 0.5–117 nm)与X射线辐射及高能粒子, 使行星大气面临多重扰动与演化压力. 耀发期间, XUV辐射强度可瞬时提升数个数量

级[15,39], 驱动大气上层的光化学反应和加热过程, 主要产生以下影响.

(1) 大气电离与臭氧破坏: 强烈的XUV辐射和高能粒子流导致臭氧层耗损, 削弱对紫外线的屏蔽作用, 使更多UVC (1000–2800 Å)和UVB (2800–3150 Å)辐射穿透至地表, 危及生命形成所需的稳定辐射环境[40,41].

(2) 大气逃逸与水分丧失: 耀发期间高能输入使热层温度升高, 逃逸速度增强, 显著提升氢及轻元素的逃逸率. 长期累积效应可能导致行星水分流失, 破坏液态水的稳定存在[42].

(3) 有机分子的破坏与潜在合成: 高能粒子既可能破坏关键有机分子, 又可能激发前生物化学反应, 对生命前体形成具有双重影响[43,44].

M型恒星是主序星中磁活动最为强烈和持久的类型, 长期维持高频率的强耀发[6,45]. 已知的系外类地行星中, 绝大多数(PHL@UPR Arecibo数据库29颗中的27颗)环绕M型恒星运行, 因而M型恒星行星的宜居性成为研究热点和难点.

耀发频率随恒星年龄增长显著下降. 以年轻的M1型星AU Mic为例, 其年龄约为(23 ± 3) Myr, 已观测到显著的大气逃逸现象[46], 为早期XUV辐射主导下行星大气演化的研究提供了重要案例. 图5展示了AU Mic b, c, d三颗行星的大气逃逸速率及与耀发事件驱动的瞬时逃逸率对比.

尽管现有观测对耀发产生的高能辐射已有一定了解, 但极低频(0.1–30 MHz)射电波段的观测还存在明显空白, 限制了对耀发中非热粒子加速及等离子体过程对行星空间环境影响的全面认识. “鸿蒙计划”将通过在月球轨道部署极低频射电阵列, 突破地球电离层和人类无线电干扰的限制, 在以下两个方面为评估行星宜居性提供关键支持.

(1) 基于极低频射电辐射约束非热粒子注入, 为大气逃逸模型提供输入边界: “鸿蒙计划”将首次在0.1–30 MHz波段对恒星耀发进行系统观测, 捕捉非热电子引发的相干辐射(如等离子体发射、电子回旋辐射)的功率谱与时间结构. 这些辐射形式对耀发中非热电子能谱(特别是低能端)高度敏感, 可用于约束高能粒子注入过程的物理特征. 结合同步的X射线与极紫外观测, 可建立耀发期间高能输入的能量区间, 为大气逃逸模型提供关键输入, 量化不同磁活动阶段下的能量沉积与逃逸响应, 特别适用于M型星与年轻恒星样本的统计性研究.

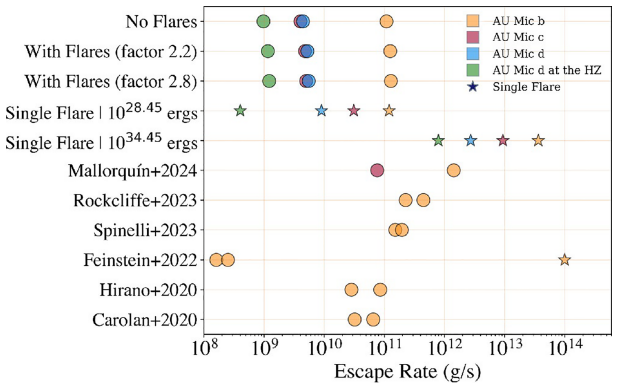



**图 5** AU Mic系统中b, c, d三颗行星的大气逃逸率及耀发事件驱动的瞬时逃逸率对比. 图片来自文献[47], 已获得授权

**Figure 5** Comparison of atmospheric escape rates for the AU Mic planets b, c, and d, including flare-driven instantaneous escape rates. Reprinted from ref. [47], with the permission of American Astronomical Society.

(2) 拓展M型星耀发辐射频谱的极低频射电覆盖, 参与构建多波段辐射标定模型: 通过长期监测大量M型恒星的极低频射电耀发事件, “鸿蒙”可获取功率谱、频率漂移、持续时间等关键参数, 填补当前耀发辐射频谱在极低频射电端的观测空白. 结合已有紫外数据库(如MUSCLES, HAZMAT)与其他高能观测平台的数据, 可建立极低频射电-紫外间的辐射标定关系, 提升M型星高能辐射历史的回溯建模精度, 进一步用于评估类地行星长期宜居性演化过程中的高能环境约束.

综上, “鸿蒙计划”可在现有多波段观测体系的基础上, 填补恒星耀发极低频射电波段的观测空白, 提供关键的能谱约束与辐射统计信息, 揭示非热能量注入过程与行星空间环境扰动之间的物理联系, 并在多波段协同框架下, 助力从“类太阳空间天气”角度系统评估系外行星宜居性的形成与演化条件.

### 1.3 多波段辐射机制

尽管前文已重点讨论了低频射电波段中恒星耀发的辐射机制, 但耀发本质上还是一种跨越电磁波多波段的能量释放过程. 为更完整地说明不同观测波段在耀发研究中的诊断作用, 本节从多波段角度简要介绍恒星耀发在光学及其他波段中的辐射特征, 并说明这些观测与低频射电观测之间的物理联系. 在多波段中,

光学波段仍是最基础也是最广泛应用的观测窗口. 恒星耀发在可见光范围内的辐射增强, 通常表现为亮度的迅速上升和缓慢下降, 这种典型的光变曲线形态反映出耀发过程中能量释放与耗散的基本时序结构[39]. 通过对耀发光变曲线的高时序分辨监测, 可以精确获取诸如上升时间、峰值时刻以及衰减时间等关键参数, 进而估算耀发能量的释放速率和持续时间.

在时间结构上, 典型的光学耀发可以划分为三个阶段: 上升期、峰值期和下降期. 图6为部分耀发的光变曲线示例, 其上升期一般持续几十秒到数分钟, 反映了能量输入的快速启动; 峰值期常在光变曲线顶部表现为饱和状态或短暂停滞; 下降期则由于等离子体的辐射与传导冷却, 持续时间可达数十分钟[12]. 耀发光度$L_{\rm flare}(t)$的积分决定耀发总能量:

$$E_{\rm flare} = \int_{t_0}^{t_1} L_{\rm flare}(t){\rm d}t, \tag{4}$$

其中$t_0$与$t_1$分别是耀发开始与结束时刻. 大量Kepler与TESS数据表明, 耀发能量呈幂律谱分布:

$$\frac{{\rm d}N}{{\rm d}E} \propto E^{-\alpha}. \tag{5}$$

对具有外对流层的F, G, K, M型恒星, 观测得到的幂律指数$\alpha$的取值在1.5–2.3之间, 多数集中在2附近[13,48]. 而对于A型恒星, 部分研究发现$\alpha$分布得更加平坦, 约在1.2–1.4之间[49], 由于A型恒星缺乏深对流层, 其耀发活动可能部分来源于未分辨的晚型伴星或特殊磁化恒星, 因此其耀发物理机制仍存在争议.

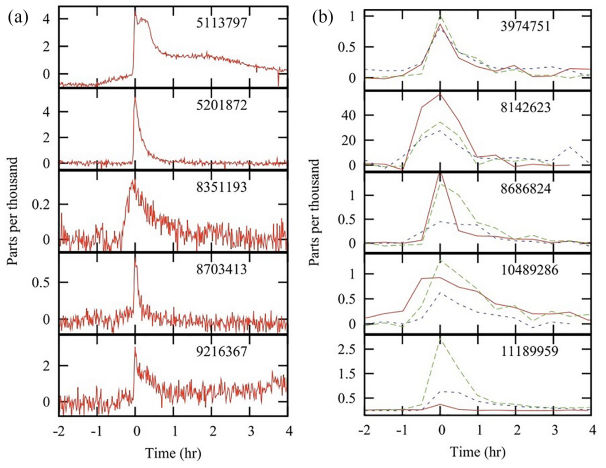



**图 6** (a) Kepler短曝光数据探测到的A型恒星耀发光变曲线样本; (b) Kepler长曝光数据探测到的A 型恒星耀发光变曲线样本[36]

**Figure 6** (a) Sample flare light curves of A-type stars detected with Kepler short-cadence data; (b) sample flare light curves detected with long-cadence data [36].

耀发活动的这一幂律性质揭示了恒星磁活动具有分形结构, 可能受到MHD湍流过程调控. 除了光度演化, 光学波段谱线特征亦为耀发提供重要诊断工具. 尤其是在Balmer, Ca II H&K, He I 等谱线中, 耀发期间常表现出显著的发射增强、展宽与非对称结构. 例如, 在AD Leo的一次强耀发中, $H_\alpha$与$H_\beta$的等离子体展宽速度高达200–300 km/s, 表现出向上流(Blue-shift)和向下流(Red-shift)成分, 指示耀发区域存在高速物质喷流[35]. 谱线轮廓可用多高斯拟合方式分解, 以估计不同速度成分及其动力学特性. 更进一步的研究利用时间分辨光谱测量不同离子线的光变曲线, 例如Mg II H&K线的强化程度可用于追踪色球层的热结构[50], 而Balmer跳跃的变化反映了自由-自由和自由-束缚过程对耀发光谱的影响[8]. 这些细节在理解色球与光球之间的能量传输方面具有重要意义.

光学耀发研究在多波段观测中起到定时与识别的核心作用. 通过将光学与X射线、射电光变曲线进行时间对齐, 可以判断各层大气中物理过程的相互作用, 例如光学峰值常滞后射电爆发几秒, 表明能量释放从高层磁冠传播至低层色球的时间尺度[8]. 进一步而言, 光学光谱为我们提供了耀发区物理状态的重要诊断手段. 在耀发发生时, 恒星色球层与日冕区之间会出现剧烈的温度与密度梯度, 各类谱线因局域温度、密度变化及高能电子碰撞作用而发生强度增强与展宽. Balmer线、Ca II乃至He I谱线均在耀发期间表现出显著增强与展宽, 这些现象可归因于高密度等离子体的非热激发过程[51]. 谱线轮廓的演化不仅揭示了耀发期间物质流动的速度信息, 还提供了局域温度分布与压强状态的演变轨迹.

而相比于光学波段对于“热等离子体”过程的灵敏性, X射线观测则更适用于研究耀发过程中的高能物理机制. 在耀发爆发期, 恒星星冕的温度可升高至数百万甚至上千万K, 进而产生强烈的软X射线(Soft X-ray, SXR)和硬X射线(Hard X-ray, HXR)辐射[52]. XMM-Newton, Chandra以及最近的NICER等天文台提供了丰富的时间分辨与能谱分辨X射线耀发数据. 软X射线通常源自高温等离子体的韧致辐射, 而硬X射线则主要由高能电子撞击冷物质产生的非热过程主导. X射线的时变曲线也呈现出丰富的结构, 如快速脉冲、震

荡以及指数衰减等特征, 这些信息有助于识别能量释放的触发条件及后续等离子体演化过程[53].

在恒星耀发事件的多波段研究中, 红外观测发挥着不可替代的作用, 特别是在探索耀发与周围环境相互作用方面. 耀发过程释放出大量能量, 不仅影响恒星自身的大气结构, 还会对其周围的低温物质(如尘埃和分子云)造成加热效应. 当高能辐射(如X射线和紫外线)穿透星周介质并沉积能量时, 尘埃颗粒被加热后会在中红外至远红外波段重新辐射能量, 从而在这些波段产生耀发诱导的瞬时红外亮度增强. 这种红外响应通常具有一定的时间滞后, 反映了能量从耀发区传导至星周尘埃的热传导与再辐射过程的物理时间尺度[54].

在低能端, 射电波段提供了对于耀发非热电子群体和磁场结构的关键信息, 部分内容已在第1.1.3节中讨论. 高能电子在磁场中作螺旋运动, 产生同步辐射, 其强度与磁场强度、粒子能谱和观测角度密切相关. 通过分析射电爆发的频谱演化和偏振特征, 可以获取耀发区磁场拓扑与电子加速区域的几何结构[33]. 此外, 射电波段还能捕捉到激波传播与等离子体扰动. 例如Type III射电爆发通常由沿磁力线传播的高能电子束触发, 其频率随时间降低的漂移行为可用于估算电子的速度和背景等离子体密度梯度[55]. 近年来, 一些快速射电暴被认为可能源于极端耀发事件, 这一假设尽管仍具争议, 但已在红矮星耀发系统中观察到类似的短时强烈射电爆发, 还为这一连接提供了观测支持[56].

不同波段提供互补信息: 光学记录热瞬变, X射线追踪高能等离子体加热, 红外呈现热反馈路径, 射电则反映粒子加速与磁场重构. 联合建模可揭示能量从磁场转化为热与动能的完整链条. 例如在AD Leo等星体的多波段同时观测中, 可见射电先行、X射线与光学紧随其后、红外滞后响应的时间序列[57–59], 构建了从磁重联、粒子加速、辐射释放到环境反馈的完整耀发物理图景.

而“鸿蒙计划”是中国提出的首个面向极低频射电天文观测的大规模空间干涉阵列任务, 计划通过绕月卫星编队实现0.1–120 MHz频段的全天空射电成像与频谱测量[60]. 尽管其主要目标为研究宇宙黑暗与黎明, 但该任务还为研究恒星耀发现象提供了前所未有的机会. 当前射电望远镜如LOFAR和NWA主要覆盖大于30 MHz频段的范围, 而“鸿蒙计划”能将覆盖范围下探到0.1 MHz, 有望实现0.1–30 MHz的高分辨率成像. 这一区间恰好对应恒星耀发中等离子体频率发射和地基望远镜观测盲区, 具有重要补充意义. 鸿蒙配置的全天成像模式与干涉测量技术允许全天监测多个恒星场, 可提高耀发事件捕获概率, 并允许构建极低频射电耀发统计样本. 为了实现有效的数据互补与物理解释, 需构建从观测到建模的完整多波段联合分析框架. 例如TESS光变中的强突变事件可作为射电数据的搜索窗口, 而若在对应时段内鸿蒙探测到同步的极低频射电增强, 则可进一步确认其为真实耀发且具备非热成分[33]. 通过建模不同波段的辐射机制与传播路径, 构建统一的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)模型, 反演耀发区域的电子密度、磁场强度与非热粒子谱指数.

恒星耀发的理论研究已形成较为成熟的模型框架, 基本遵循“储能-触发-加速-辐射-耗散”五阶段路径[61]. 此一序列在太阳上已有清晰观测印证, 而在其他恒星, 尤其是低质量恒星或年轻星对象上, 则更具参数空间的多样性. 要构建统一而普适的恒星耀发物理图像, 必须依赖多波段, 尤其是极端边界条件下的探测数据. “鸿蒙计划”提供的极低频数据将从多个方面对物理图像建构产生关键作用. “鸿蒙计划”的0.1–10 MHz观测正对应于等离子体密度为$n_e \approx 10^3$–$10^4$ cm$^{-3}$的外冕或星风区, 可用于探测这些前驱信号, 从而为耀发起始条件与时间标定提供新的依据[62]. 此外, 在大尺度非热粒子传播过程中, 由于电子束在磁场中沿磁力线传播, 其回旋辐射特征将随着路径上的磁场强度而改变, 从而在频率空间呈现出多峰结构. 利用鸿蒙获取的广谱数据, 可以解耦粒子传播路径与磁场变化函数, 进而重构磁场拓扑形态[63]. 在后耀发阶段, 若恒星存在类似日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)过程, 则其驱动的激波与粒子流可能引发长时间尺度的低频射电电磁活动, 包括二型(Type II)与三型(Type III)耀发射电爆发[64]. 鸿蒙的连续观测可捕捉这类演化活动, 进一步验证低质量恒星是否具有类太阳空间天气系统, 对研究系外行星磁环境、宜居性边界等亦具有重要意义[65]. 综上所述, “鸿蒙计划”所提供的极低频数据不仅填补了观测频谱上的空白, 还在物理机制上引入了新的约束条件与观测证据, 其在耀发起始、传播、耗散以及与恒星大气

与磁场的相互作用过程中具有不可替代的作用.

值得注意的是, 射电波段不仅在研究恒星磁活动中扮演关键角色, 还为探索宇宙中潜在的智慧生命提供了重要途径. 恒星活动不仅决定了行星系统的辐射环境, 还深刻影响类地行星大气层的稳定性与演化, 从而影响生命起源与延续的可能性.

在上述恒星耀发与磁活动研究之外, 极低频射电观测所获得的宽视场、长时间序列动态频谱数据, 也为开展其他低频瞬变与窄带信号搜索提供了重要机会. 例如, 在长期频谱监测与精细射频干扰识别的基础上, 同一观测数据还可用于开展地外智慧生命射电信号的机遇性搜寻. 因此, “鸿蒙计划”在系统研究恒星耀发物理过程的同时, 也为低频SETI研究提供了独特的数据基础与观测平台.

## 2 地外智慧生命射电搜寻

在探索地外智慧生命的过程中, 科学界普遍认为, 生命的产生与演化高度依赖于母恒星的稳定辐射与磁活动特性. 借鉴太阳系的经验, 中心恒星的耀发频率与强度直接影响着类地行星的宜居性与大气层演化. 而从技术手段来看, 目前阶段尚无法通过光学波段直接搜寻外星文明, 因此, “搜寻地外智慧生命”项目主要聚焦于射电波段的信号探测[55]. 基于FAST的相关SETI研究已经体现出利用射电望远镜来探测地外智慧生命的潜在可能性[66–68]. 近年来对系外行星的研究表明, 银河系中存在大量类地行星, 这提高了地外智慧生命存在的可能性[69]. 人类广泛采用射电波段进行长距离信息传输, 例如广播、电视与无线电通信设备均覆盖30–850 MHz范围. 地球自20世纪初开始便持续向外发射射电信号, 迄今已有超过百年的历史, 最早的广播信号现已传播至超过30 pc的宇宙空间. 假如在这一范围内存在智慧文明且具备监听能力, 它们理论上已有可能接收到人类活动的“射电足迹”. 由此推断, 若地外智慧生命发展出类似的通信技术, 其信号也极可能落于射电波段. 这正是SETI项目聚焦于该波段开展搜寻的科学动因.

### 2.1 SETI探测原理

对可能源自地外智慧生命的信号进行识别, 首先需要对其信号特征作出合理假设与判据设定. 我们已经对人类产生及来自天体的射电信号有了很好的理解, 而地外智慧生命信号可能主要是频率域很窄的信号或时间域很窄的射电脉冲信号, 这些信号适合星际通讯. 来自天体的电磁波信号各种随机过程导致其谱线致宽, 频率最窄的天体辐射是脉泽, 为500 Hz. 因此地外智慧生命信号的频率宽度一般在500 Hz以下, 因此我们需要寻找窄带频率的信号(图7(a))或者调制的脉冲信号(图7(b)), 这是可能的地外智慧生命的信号.

SETI基于地外智慧生命的存在会向宇宙中发射无线电波的假设, 通过利用大型射电望远镜扫描恒星附近的区域, 对获得的信号进行去除射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI), 即去除掉来自地球或者人造的近地信号, 在筛选结果中找到有规律的发生多普勒漂移的事件, 并对这些信号位置进行跟踪观测, 如果仍有规律的出现, 那么就有可能是真正的SETI信号[70].

### 2.2 SETI射电疑似信号的提取

射电天文学是依赖于观测的学科, 然而大型望远镜的观测时间非常宝贵, 通常一段时间内, 只能对某

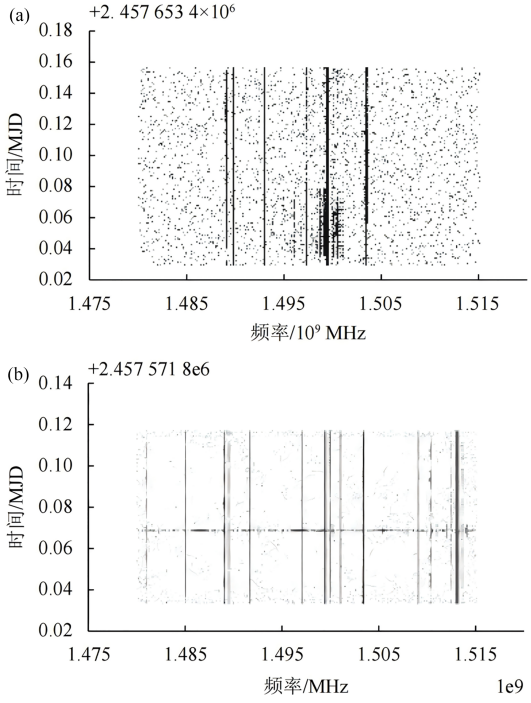



**图 7** (a) 窄带和(b) 宽带频谱信号

**Figure 7** Signal from (a) narrow band and (b) wide band.

一种源进行观测. 这种排他性, 使得一段观测时间内所得到的观测数据只能为一种科学目标所用. 为了提高数据的使用效率, 在观测时同时记录分析用于不同科学目标的数据的技术手段, 得到了越来越多的人的关注. 在进行同时观测的时候, 望远镜指向由其主要观测目标决定, 此时, 二级观测同样可以接收到数据, 从而提高了观测效率. 同时观测(Commensal Survey)这一概念, 正是由早期从事SETI工作的科学家们提出, 并在美国加州哈特克里克天文台、绿岸望远镜以及阿雷西博望远镜上进行了尝试[71]. 在搜寻地外智慧生命的研究中, 科学家们需要尽可能多的观测时间和观测尽可能大的天区. 近年来, 随着高性能计算机的普及, 利用高性能计算机对射电望远镜的观测数据进行分布式计算, 使我们能够同时进行数据处理[72–74]. 用于SETI研究的后端接收系统安装在望远镜接收机的后端, 在使用这一接收机进行观测的时候, 接收机接收到的数据会分别发送至不同的后端设备, 有用于SETI实验的后端设备, 同时还有用于观测脉冲星、中性氢、快速射电暴等不同科学目标的后端设备. 其基本工作原理是记录满足信噪比阈值($S/N > 30$)的单个信号通道, 每个这样的信号被称为一个hit[66], 这些hits数据会通过数据采集系统hashpipe[2)]存储到缓存中, 进而传递给GPU计算出斯托克斯参量, 输出用于科学计算的fits[3)]格式的文件, 包含着时间、频率和坐标等信息. 流程图如下图8. 我们在找窄带SETI信号的过程中, 会遇到大量宽带信号, 包括来自地球表面的雷击以及电火花事件等, 它们有一个强杂散的宽带信号. 为了衡量出每个观测时间的信号频率杂散程度, 我们对信号数据hit进行升序排列后, 对每个观测时刻求其谱

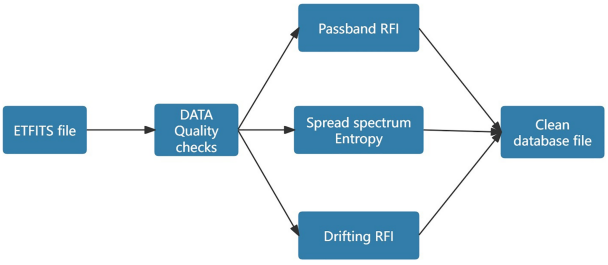



**图 8** 数据处理流程图

**Figure 8** Pipeline of data analyzing.

2) https://github.com/david-macmahon/hashpipe.

3) https://fits.gsfc.nasa.gov.

熵. 如下式:

$$E_k = \frac{1}{N_k}\sum_{i=0}^{N_k-1}\left(H_{k,i} - H_{k,i+1}\right)^2, \tag{6}$$

其中$k$代表每一个观测的时间瞬间, $H_{k,i}$代表排序后的$k$时刻每条hit记录的序数, $N_k$表示每个时间有多少个hit记录数. 依据上式求出不同时间的谱熵. 根据原理, 如果频谱出现某种聚集, 则谱熵会比较低. 我们针对谱熵用$3\sigma$准则找到阈值之外的信号记录, 把这些频谱从窄带分析中分离出来. 因为一个相对强的SETI信号可能出现在多个相近频率, 从而表现出低频射电谱熵. 而为避免误删此类聚集信号, 需保留频率数少于1024的时刻, 这一阈值可以平衡分辨率与计算负担, 实现最优计算效率.

得到这些数据只是第一步, 如何处理数据同样具有很大挑战, 大部分hits都来自RFI[75]. 怎样在这些数据中找到我们想要的数据? 我们并不了解地外智慧生命会在什么频率发出信号, 也不知道它们发出的信息的格式, 对于它们发出信号的时间和方位也一无所知. 因此要回答这个问题, 我们首先要对地外智慧生命发出的信号会有什么特性作出基本的假设. 根据人类射电波段通讯的特点, 我们可以假设地外智慧生命发出的信息在短时间内具有持续性(即图7中左边的埋藏在噪声中的窄带信号), 区别于快速射电暴, 有一定的重复性, 但是又不同于脉冲星的精确周期性[76]. 举例来说, FAST的19波束接收机可同时覆盖天空中多个不同区域, 如果相隔很远的两个波束观测到了同一个hit, 那么这个信号就是RFI, 需要在数据处理的过程中被去除[77]. 这是因为如果有地外智慧生命发出射电信号, 那么这个信号应该是从一个点发出来的, 而不是天空的各个方向都能接收到.

## 2.3 低频阵列: SETI的理想平台

地外智慧生命的潜在通讯信号, 通常以窄带频率特征或调制脉冲射电信号为典型表现形式. 地球上FM广播(88–108 MHz)、电视信号(40–850 MHz)等常用通信频段, 因适配远距离通讯需求, 也成为搜寻地外智慧生命的重点关注波段, 而这类频段的射电观测, 对观测环境的RFI抑制能力提出了极高要求.

传统SETI观测多集中于GHz波段, 而极低频射电窗口的探索则长期受限: 地面观测不仅受电离层截止频率(~10 MHz)的物理阻隔, 还面临强烈的人工与自然射频干扰, 尤其是30 MHz以下的超长波波段, 成为SETI观测的重要空白区. “鸿蒙计划”以绕月轨道1主9子星线形编队构建空间分布式低频射电干涉阵列, 实现0.1–120 MHz全频段观测, 彻底突破了地面极低频观测的双重限制, 为SETI研究打造了专属的低频观测平台. 其中, 30–120 MHz观测频段恰好囊括部分地球典型通讯频段, 依托绕月轨道或月球背面的观测环境可近乎完全消除地面射频干扰; 0.1–30 MHz超长波观测段则填补了该波段SETI探索的空白, 成为极低频SETI观测的核心窗口.

“鸿蒙计划”面向极低频SETI观测的核心技术参数如表1所示, 其高时间、高光谱分辨率的动态频谱获取能力, 可对窄带或调制型人工射电信号实现高灵敏探测, 而绕月轨道的低RFI环境与宽视场长期巡天模式, 更是精准匹配SETI的观测需求. 特别是在月球背面, 由于地球无线电辐射的天然屏蔽, “鸿蒙计划”能够在极低本底干扰条件下执行对地外智慧生命信号的深度搜寻. 考虑到地外智慧生命的发射信号可能具有短时间持续性(即嵌于噪声中的窄带信号)、存在一定重复性(区别于快速射电暴, 亦非脉冲星的严格周期性), 因此采用机器学习等手段自动剔除干扰、提取特征信号尤为关键. 鉴于地外信号的方向、强度和调制方式均未知, SETI属于高度偶发性的科学目标, 尤适合“鸿蒙计划”全天域平均频谱的长期监测策略.

早在1959年, 美国康奈尔大学的Cocconi等人在*Nature*上发表开创性文章, 提出: “The probability of success is difficult to estimate; but if we never search, the chance of success is zero. (成功的概率或许难以估计, 但若我们从不寻找, 成功的机会便永远是零.)” [78].

**表 1** “鸿蒙计划”与极低频SETI观测相关的关键技术参数

**Table 1** Key technical parameters of the Hongmeng Project relevant to ultra-low-frequency SETI observations

| 参数 | 指标 |
|---|---|
| 观测频率 | 0.1–30、30–120 MHz |
| 时间分辨率 | 优于~10 ms |
| 频谱分辨率 | ⩾8192频点(0.1–30 MHz)、⩽100 kHz (30–120 MHz) |
| 观测环境 | 绕月轨道(月球背面天然屏蔽地球RFI) |
| 观测方式 | 宽视场全天域长期巡天 |

### 2.4 数据率与可疑信号产出估算

“鸿蒙计划”包括高频(30–120 MHz)与低频射电(0.1–30 MHz)两个观测子系统, 均具备高频率分辨率与毫秒级时间采样能力, 能够对全天区进行持续谱测量. 根据系统设计参数, 估算其数据产出如下.

高频段的有效带宽为90 MHz, 频率分辨率优于100 kHz (不少于1000个频谱通道), 假设时间采样率为1 ms, 且每个通道以32位(4字节)浮点数记录, 每秒约生成4 MB数据. 低频射电波段则采用8192点FFT分辨, 频率分辨率约为3.66 kHz, 产生的数据量约为32.8 MB/s. 两者合计, 系统常规运行下的瞬时数据率约为36.8 MB/s.

若系统全年(365天)连续观测, 其数据产出如表2所示.

根据已有SETI数据处理经验估算, 每处理约30 TB的数据, 平均可筛选出一条具备后续分析价值的可疑信号候选(Suspicious Candidate) [79]. 据此推算, “鸿蒙计划”在常规运行模式下每年可产生超过1.16 PB的观测数据, 预计将产生约38条疑似SETI信号. 这一产出能力有望使其成为全球SETI研究中可疑信号发现数量最多的设施之一.

未来, 随着自动干扰识别、信号分类和机器学习算法的持续进步, “鸿蒙计划”有望进一步提升信号识别准确性与处理效率, 为人类寻找地外智慧生命打开前所未有的窗口.

## 3 总结

“鸿蒙计划”通过构建覆盖0.1–30 MHz的极低频射电观测系统, 为恒星磁活动与地外智慧生命搜寻提供了前所未有的观测能力补充. 其独特的频率覆盖与低电磁干扰环境, 弥补了现有射电望远镜在极低频射电波段的长期空白.

**表 2** “鸿蒙计划”不同频段数据率与年度数据产出估算

**Table 2** Estimated data rates and annual data volumes of the Hongmeng Project across different frequency bands

| 频段 | 每秒数据量 | 每日数据量 | 每年数据量 |
|---|---|---|---|
| 30–120 MHz | 4 MB/s | 345.6 GB/day | 126 TB/year |
| 0.1–30 MHz | 32.8 MB/s | 2.83 TB/day | 1.03 PB/year |
| 总计 | 36.8 MB/s | 3.18 TB/day | 1.16 PB/year |

在恒星耀发研究方面, “鸿蒙计划”在理想情况下理论上每年可探测~$10^7$个极低频射电耀发事件, 显著拓展当前多波段耀发样本数量, 特别有助于研究相干辐射、电子加速机制与耀发时间结构的低频射电演化过程.

在SETI方向, 鸿蒙系统全年数据产出预计达1.16 PB, 可筛选出约38条具备后续验证价值的可疑信号, 配合其全天域监测策略与高频谱分辨能力, 有望成为全球SETI研究中高产信号候选的重要来源平台.

总体而言, “鸿蒙计划”将在极低频射电波段打开一个全新窗口, 不仅揭示恒星磁活动的新物理过程, 还为探索地外智慧文明提供关键支撑, 其科学潜力将在未来的天体物理和天文技术发展中发挥重要作用.

## 参考文献


1 Yang W J, Wang Z, Wang M Y, et al. A novel low-frequency radio astronomical observation array (1–90 MHz) and its first light. Res Astron Astrophys, 2023, 23: 125007
2 Yan J, Wu J, Gurvits L I, et al. Ultra-low-frequency radio astronomy observations from a Seleno-centric orbit. Exp Astron, 2023, 56: 333–353
3 Benz A O, Güdel M. Physical processes in magnetically driven flares on the Sun, stars, and young stellar objects. Annu Rev Astron Astrophys, 2010, 48: 241–287
4 Boteler D H. The super storms of August/September 1859 and their effects on the telegraph system. Adv Space Res, 2006, 38: 159–172
5 Maehara H, Shibayama T, Notsu S, et al. Superflares on solar-type stars. Nature, 2012, 485: 478–481
6 Shibayama T, Maehara H, Notsu S, et al. Superflares on solar-type stars observed with *Kepler*. I. Statistical properties of superflares. Astrophys J Suppl Ser, 2013, 209: 5
7 Hawley S L, Fisher G H. X-ray-heated models of stellar flare atmospheres—Theory and comparison with observations. Astrophys J Suppl Ser, 1992, 78: 565–592
8 Kowalski A F, Hawley S L, Wisniewski J P, et al. Time-resolved properties and global trends in dMe flares from simultaneous photometry and spectra. Astrophys J Suppl Ser, 2013, 207: 15
9 Kretzschmar M. The Sun as a star: Observations of white-light flares. Astron Astrophys, 2011, 530: A84
10 Kleint L, Heinzel P, Judge P, et al. Continuum enhancements in the ultraviolet, the visible and the infrared during the X1 flare on 2014 March 29. Astrophys J, 2016, 816: 88
11 Kowalski A F, Butler E, Daw A N, et al. Spectral evidence for heating at large column mass in umbral solar flare kernels. I. IRIS near-UV spectra of the X1 solar flare of 2014 October 25. Astrophys J, 2019, 878: 135
12 Davenport J R A. The Kepler catalog of stellar flares. Astrophys J, 2016, 829: 23
13 Ilin E, Schmidt S J, Davenport J R A, et al. Flares in open clusters with K2. Astron Astrophys, 2019, 622: A133
14 Ilin E, Schmidt S J, Poppenhäger K, et al. Flares in open clusters with K2. Astron Astrophys, 2021, 645: A42
15 Feinstein A D, Seligman D Z, France K, et al. Evolution of flare activity in GKM stars younger than 300 Myr over five years of TESS observations. Astron J, 2024, 168: 60
16 Li M, Wang L, Zou Z Q, et al. Stellar flare detection methods in TESS data: Application and performance study. Astron Tech Instrum, 2025, 2: 310–318
17 Skumanich A. Time scales for CA II emission decay, rotational braking, and lithium depletion. Astrophys J, 1972, 171: 565
18 Pizzolato N, Maggio A, Micela G, et al. The stellar activity-rotation relationship revisited: Dependence of saturated and non-saturated X-ray emission regimes on stellar mass for late-type dwarfs. Astron Astrophys, 2003, 397: 147–157
19 Wright N J, Drake J J, Mamajek E E, et al. The stellar-activity-rotation relationship and the evolution of stellar dynamos. Astrophys J, 2011, 743: 48
20 Reiners A, Schüssler M, Passegger V M. Generalized investigation of the rotation-activity relation: Favoring rotation period instead of Rossby number. Astrophys J, 2014, 794: 144
21 Wright N J, Drake J J. Solar-type dynamo behaviour in fully convective stars without a tachocline. Nature, 2016, 535: 526–528
22 Judge P G, Solomon S C, Ayres T R. An estimate of the Sun's *ROSAT*-PSPC X-Ray luminosities using *SNOE*-SXP measurements. Astrophys J, 2003, 593: 534–548
23 Ayres T R. The Maunder Minimum and the variable Sun-Earth connection. Nature, 2015, 517: 473–474

24 Martins B L C, Gomes R L, Messias Y S, et al. A search for rotation periods in 1000 TESS objects of interest. Astrophys J Suppl Ser, 2020, 250: 20

25 Shkolnik E L, Barman T S. Hazmat. I. The evolution of far-UV and near-UV emission from early M stars. Astron J, 2014, 148: 64

26 Vidotto A A, Gregory S G, Jardine M, et al. Stellar magnetism: Empirical trends with age and rotation. Mon Not R Astron Soc, 2014, 441: 2361–2374

27 West A A, Weisenburger K L, Irwin J, et al. An activity-rotation relationship and kinematic analysis of nearby mid-to-late-type M dwarfs. Astrophys J, 2015, 812: 3

28 Davenport J R A, Covey K R, Clarke R W, et al. The evolution of flare activity with stellar age. Astrophys J, 2019, 871: 241

29 Paudel R R, Gizis J E, Mullan D J, et al. K2 ultracool dwarfs survey. III. White light flares are ubiquitous in M6-L0 dwarfs. Astrophys J, 2018, 858: 55

30 Barnes S A. On the rotational evolution of solar- and late-type stars, its magnetic origins, and the possibility of stellar gyrochronology. Astrophys J, 2003, 586: 464–479

31 Barnes S A. Ages for illustrative field stars using gyrochronology: Viability, limitations, and errors. Astrophys J, 2007, 669: 1167–1189

32 Barnes S A. A simple nonlinear model for the rotation of main-sequence cool stars. I. Introduction, implications for gyrochronology, and color-period diagrams. Astrophys J, 2010, 722: 222–234

33 Villadsen J, Hallinan G. Ultra-wideband detection of 22 coherent radio bursts on M dwarfs. Astrophys J, 2019, 871: 214

34 Reid H A S, Ratcliffe H. A review of solar type III radio bursts. Res Astron Astrophys, 2014, 14: 773–804

35 Hawley S L, Pettersen B R. The great flare of 1985 April 12 on AD Leonis. Astrophys J, 1991, 378: 725

36 Balona L A. Kepler observations of flaring in A-F type stars. Mon Not R Astron Soc, 2012, 423: 3420–3429

37 Tan B. Diagnostic functions of solar coronal magnetic fields from radio observations. Res Astron Astrophys, 2022, 22: 072001

38 Chen L, Ma B, Wu D, et al. Spectral characteristics of fundamental-harmonic pairs of interplanetary type III radio bursts observed by PSP. Astrophys J Lett, 2024, 975: L37

39 Hawley S L, Davenport J R A, Kowalski A F, et al. *Kepler* flares. I. Active and inactive M dwarfs. Astrophys J, 2014, 797: 121

40 Segura A, Walkowicz L M, Meadows V, et al. The effect of a strong stellar flare on the atmospheric chemistry of an Earth-like planet orbiting an M dwarf. Astrobiology, 2010, 10: 751–771

41 Tilley M A, Segura A, Meadows V, et al. Modeling repeated M dwarf flaring at an Earth-like planet in the habitable zone: Atmospheric effects for an unmagnetized planet. Astrobiology, 2019, 19: 64–86

42 Luger R, Barnes R. Extreme water loss and abiotic $O_2$ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs. Astrobiology, 2015, 15: 119–143

43 Airapetian V S, Glocer A, Gronoff G, et al. Prebiotic chemistry and atmospheric warming of early Earth by an active young Sun. Nat Geosci, 2016, 9: 452–455

44 Airapetian V S. The environment of the young Earth in the perspective of an young Sun. In: Nandy D, Valio A, Petit P, eds. Living Around Active Stars. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 315–328

45 Günther M N, Zhan Z, Seager S, et al. Stellar flares from the first TESS data release: Exploring a new sample of M dwarfs. Astron J, 2020, 159: 60

46 Rockcliffe K E, Newton E R, Youngblood A, et al. The variable detection of atmospheric escape around the young, hot Neptune AU Mic b. Astron J, 2023, 166: 77

47 do Amaral L N R, Shkolnik E L, Loyd R O P, et al. The impact of stellar flares on the atmospheric escape of exoplanets orbiting M stars. I. Insights from the AU Mic system. Astrophys J, 2025, 985: 100

48 Yang H, Liu J. The flare catalog and the flare activity in the Kepler mission. Astrophys J Suppl Ser, 2019, 241: 29

49 Althukair A K, Tsiklauri D. Main sequence star super-flare frequency based on entire Kepler data. Res Astron Astrophys, 2023, 23: 085017

50 Rubio da Costa F, Kleint L. A parameter study for modeling Mg II h and k emission during solar flares. Astrophys J, 2017, 842: 82

51 Fuhrmeister B, Liefke C, Schmitt J H M M, et al. Multiwavelength observations of a giant flare on CN Leonis. Astron Astrophys, 2008, 487: 293–306

52 Güdel M. X-ray astronomy of stellar coronae. Astron Astrophys Rev, 2004, 12: 71–237

53 Reale F. Diagnostics of stellar flares from X-ray observations: From the decay to the rise phase. Astron Astrophys, 2007, 471: 271–279

54 Flaherty K M, Muzerolle J, Wolk S J, et al. Connecting X-ray and infrared variability among young stellar objects: Ruling out potential sources of disk fluctuations. Astrophys J, 2014, 793: 2

55 Cobb J, Lebofsky M, Werthimer D, et al. SERENDIP IV: Data acquisition and analysis. ASP Conf Ser, 2000, 213: 485

56 Zhang J, Tian H, Zarka P, et al. Fine structures of radio bursts from flare star AD Leo with FAST observations. Astrophys J, 2023, 953: 65

57 Mohan A, Mondal S, Wedemeyer S, et al. Energetic particle activity in AD Leo: Detection of a solar-like type-IV burst. Astron Astrophys, 2024, 686: A51

58 Namekata K, Maehara H, Sasaki R, et al. Optical and X-ray observations of stellar flares on an active M dwarf AD Leonis with the Seimei Telescope, SCAT, NICER, and OISTER. Publ Astron Soc Jpn, 2020, 72: 68

59 Stelzer B, Caramazza M, Raetz S, et al. The great flare of 2021 November 19 on AD Leonis. Astron Astrophys, 2022, 667: L9

60 Chen X L, Yan J Y, Xu Y D, et al. Discovering the sky at the longest wavelength mission—A pathfinder for exploring the cosmic dark ages (in Chinese). Chin J Space Sci, 2023, 43: 43–59 [陈学雷, 阎敬业, 徐怡冬, 等. 宇宙黑暗时代探路者——鸿蒙计划. 空间科学学报. 2023, 43: 43–59]

61 Shibata M, Taniguchi K. Coalescence of black hole-neutron star binaries. Living Rev Relativ, 2011, 14: 6

62 Melrose D B, Dulk G A. Electron-cyclotron masers as the source of certain solar and stellar radio bursts. Astrophys J, 1982, 259: 844–858

63 Bastian T S, Benz A O, Gary D E. Radio emission from solar flares. Annu Rev Astron Astrophys, 1998, 36: 131–188

64 Gopalswamy N. Coronal mass ejections and solar radio emissions. In: Rucker H O, Kurth W S, Louarn P, et al., eds. Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VII). Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2011. 325–342

65 Zarka P. Plasma interactions of exoplanets with their parent star and associated radio emissions. Planet Space Sci, 2007, 55: 598–617

66 Zhang Z S, Werthimer D, Zhang T J, et al. First SETI observations with China's five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST). Astrophys J, 2020, 891: 174

67 Tao Z Z, Zhao H C, Zhang T J, et al. Sensitive multibeam targeted SETI observations toward 33 exoplanet systems with FAST. Astron J, 2022, 164: 160

68 Luan X H, Huang B L, Tao Z Z, et al. Multibeam SETI observations toward nearby M dwarfs with FAST. Astron J, 2025, 169: 217

69 Howard A W, Marcy G W, Johnson J A, et al. The occurrence and mass distribution of close-in super-Earths, Neptunes, and Jupiters. Am Astron Soc Meet Abstr, 2011, 217: 415.06

70 Harp G R, Backus P R, Kilsdonk T N, et al. A new algorithm to extract information-containing SETI signals. LPI Contrib, 2010, 1538: 5605

71 Chennamangalam J, MacMahon D, Cobb J, et al. SETIBURST: A robotic, commensal, realtime multi-science backend for the Arecibo telescope. Astrophys J Suppl Ser, 2017, 228: 21

72 Anderson D P, Korpela E, Walton R. High-performance task distribution for volunteer computing. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing. 2005. 196–203

73 Korpela E, Werthimer D, Anderson D, et al. SETI@home-massively distributed computing for SETI. Comput Sci Eng, 2001, 3: 78–83

74 Korpela E J. Distributed processing of SETI data. In: Shuch H P, ed. Searching for Extraterrestrial Intelligence. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. 183–200

75 Korpela E J, Cobb J, Lebofsky M, et al. Candidate identification and interference removal in SETI@home. In: Vakoch D A, ed. Communication with Extraterrestrial Intelligence. Albany: SUNY Press, 2011. 37–44

76 Messerschmitt D G. Interstellar communication: The case for spread spectrum. Acta Astronaut, 2012, 81: 227–238

77 Li D, Pan Z. The Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope project. Radio Sci, 2016, 51: 1060–1064

78 Cocconi G, Morrison P. Searching for interstellar communications. Nature, 1959, 184: 844–846

79 Ma P X, Ng C, Rizk L, et al. A deep-learning search for technosignatures from 820 nearby stars. Nat Astron, 2023, 7: 492–502

# Stellar flares and extraterrestrial intelligence

CHEN XunZhou[1,2†], TAO ZhenZhao[3,4†], ZHOU YunFan[1,2], CHEN HaoRan[1,2], YUE Bin[5], ZHANG JuYong[1,2], TIAN HaiJun[1,2*], YANG XiaoFeng[6*] & ZHANG TongJie[4*]

[1]*School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*
[2]*Zhijiang Branch, National Astronomical Data Center, Hangzhou 310018, China*
[3]*College of Computer and Information Engineering, Dezhou University, Dezhou 253023, China*
[4]*School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
[5]*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*
[6]*School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475004, China*
**Corresponding authors (TIAN HaiJun, email: hjtian@hdu.edu.cn; YANG XiaoFeng, email: xfyang@henu.edu.cn; ZHANG TongJie, email: tjzhang@bnu.edu.cn)*
†Equally contributed to this work

With the advancement of deep-space exploration and the search for extraterrestrial intelligence (SETI), the interdisciplinary study of stellar flares and terrestrial planet habitability has emerged as a frontier in astrophysics and astrobiology. Stellar flares represent the most intense manifestation of stellar magnetic activity, involving non-thermal particle acceleration, magnetic energy release, and multi-wavelength radiation, which are crucial for understanding stellar dynamo mechanisms and their evolution. However, the extremely low-frequency radio band of 0.1–30 MHz has long lacked systematic monitoring, severely limiting research into non-thermal particle acceleration and the early stages of magnetic reconnection during flares. At the same time, SETI radio signal detection is hindered by terrestrial electromagnetic interference and insufficient frequency coverage, highlighting the urgent need for facilities with long-term, clean observational environments. In this context, the "Hongmeng Project" aims to fill this long-standing gap in the extremely low-frequency radio band by deploying a low-frequency radio observation array in lunar orbit. Leveraging the natural electromagnetic shielding of the lunar far side, the project will combine optical, ultraviolet, and X-ray observations to systematically monitor flares from M-dwarf stars, K-type stars, and young stars. This will facilitate the construction of a "dynamo-rotation-flare" evolution model, deepen our understanding of stellar magnetic activity, and provide low-frequency radio constraints on non-thermal particle processes during flares. These observations will also aid in evaluating planetary atmospheric escape rates and establishing radiation calibration relations for M-dwarf stars in conjunction with ultraviolet data. Furthermore, since the frequency range covered by the project overlaps with Earth's wireless communication bands and enables full-sky, low-frequency radio monitoring with significantly reduced terrestrial interference on the lunar far side, the Hongmeng Project offers an ideal window for detecting potential narrowband or modulated pulse signals of technosignatures. As an important extended objective of the project, SETI will leverage long-term spectral integration to enable opportunistic discoveries, opening new pathways in the search for extraterrestrial intelligence.

**stellar activity, extrasolar planetary systems, radioastronomy**

**PACS:** 97.10.Jb, 97.82.-j, 95.85.Bh

**doi:** 10.1360/SSPMA-2026-0018