

太阳爆发的能量是如何释放的？

How is the Energy Released in Solar Eruptions?

日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)和太阳耀斑(solar flare)是太阳爆发的两种主要表现形式，代表着太阳系最剧烈的能量和物质释放过程。一次大的爆发可释放出相当于几十亿至百亿颗核弹爆炸所释放的能量，并可向日球(heliosphere)空间抛入超过百亿吨的磁化等离子体物质。当太阳爆发的产物向地球传播时，能引起地球的磁层-电离层等近地空间中电磁和等离子体环境的强烈扰动，可产生对现代社会和人类生活有重大影响的空间天气灾害事件^[1]。为了准确预报此类事件，必须对 CME 和耀斑等太阳爆发现象所涉及的各种物理过程获得全面清楚的认识。其中，爆发机制的研究尤为关键。

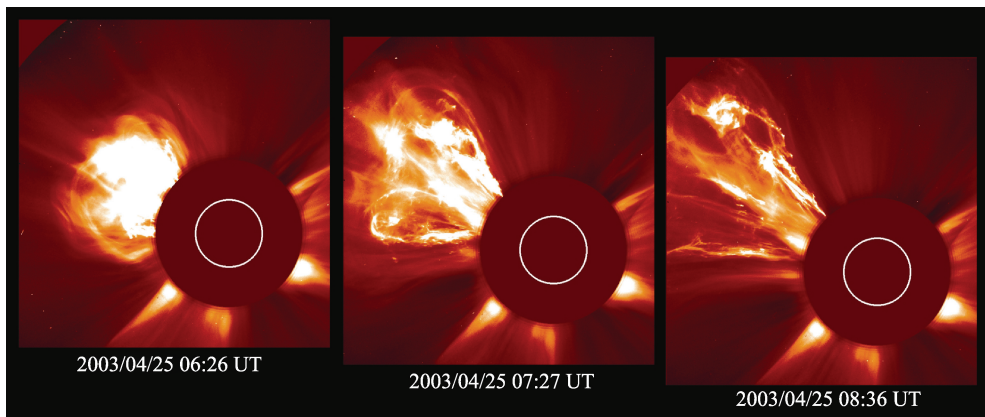


图 1 由 SOHO 卫星^①上搭载的日冕仪拍摄到发生于 2003 年 4 月 25 日的一次 CME 事件。图中红色圆盘表示遮挡太阳附近强光辐射的日冕仪挡板，中间白色圆圈代表太阳大小，第一和最后一幅图拍摄时间差别为两小时十分钟，期间 CME 抛射体以大约 800km/s 的速度向外运动。本图取自 SOHO 卫星的网页：<http://sohowww.nascom.nasa.gov>，更多太阳爆发事件的图像和动画可在该网站及 NASA 网站 http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list 中找到。

在太阳爆发机制的研究中，最重要和基本的一个问题就是太阳爆发过程中所释放的能量性质、能量产生累积和快速释放的机制、能量释放后又如何和转化为何种

^① SOHO(太阳和日球观测台)是欧空局(ESA)与美国宇航局(NASA)于 1995 年联合发射的一颗科学卫星，已经在离地球 150 万 km 的日地引力平衡点即第一拉格朗日点运行了 10 余年，为太阳爆发的科学研究提供了海量高质科学数据。

能量形式。简单地说,就是要解决能量从哪里来,又到哪里去的问题。目前学者们大都认为,CME 爆发所释放的能量来自于日冕的磁场,这些磁场能量通过光球层下方对流运动所引起的光球表面及上方的磁场扭缠和新的磁区浮现等过程慢慢输送并存储于日冕之中;在一定物理条件下,这些储存的磁能得以快速释放,并被转化为等离子体粒子运动的动能和热能。这种使用快、慢两个物理过程来描述太阳爆发的观点来自于当前一类主流的太阳爆发理论模型,即能量储存与释放模型^[2]。磁场能量快速释放的机制主要有两种,一种是宏观尺度上磁场系统的不稳定性过程;另一种则是源自较小尺度区域的、称为磁场重联^②的物理过程。在太阳耀斑过程中,目前公认可以用所谓磁场重联过程来解释磁场能量的快速释放和转化,相当部分粒子所获得的能量又迅速转化为急剧增强的软 X 射线等波段的辐射能量;而对于 CME 过程,所释放的磁能主要是用来将大尺度的磁化结构向日球空间快速抛出,具体的释能机制还存有争议,很可能上述两种不同尺度的释能过程都起作用,而且对于不同事件,不同机制的相对重要程度也可能有所不同。

事实上,CME 与耀斑现象还是密切关联的。早在 20 世纪 70 年代 CME 现象研究的早期,便已有工作发现了这种关联,并由此认为 CME 是耀斑驱动产生的。但是,学者们很快发现了许多与之矛盾的观测事实。例如,有的 CME 不伴随耀斑,很多耀斑也不伴随 CME,即便对于 CME—耀斑事件,两者也不存在固定的先后发生顺序。所以,现在学者们倾向于认为两者对应于同一类磁场爆发过程在太阳大气不同层次上的响应和表现,有物理联系但不具备因果关系^[3,4]。有结果表明,CME 的加速曲线与耀斑的软 X 射线通量的变化剖面关联密切^[5],较快的 CME 通常伴随更大强度的耀斑,这意味着 CME 的加速可能与导致耀斑的磁重联过程有关。然而,爆发前和爆发过程中的磁场位形、磁场重联或者宏观不稳定性的触发和磁能释放与再分配的具体过程、磁重联在 CME 过程中的作用、它与宏观不稳定性之间的关系等,都是尚待研究解决的问题。

太阳爆发可与原有的日冕、行星际磁场—等离子体系统发生强烈的相互作用,产生多彩的伴生现象,主要有日冕全球尺度的骚扰(如所谓 EIT 波、日冕暗化)、多波段的电磁辐射增强(如射电暴)、激波、高能粒子事件等,这些过程向我们展示了太阳爆发这一物理过程的不同侧面,这一看似简单的现象实际上蕴含着丰富的自然奥秘。

目前,相关物理过程的研究主要有以下若干困难:① 尽管日冕磁场结构在太阳爆发过程中起着最为关键的作用,目前仍没有直接测量日冕磁场的可靠技术手段;光球表面的磁场及其他许多参数的观测分辨率也尚不足以分辨出最小尺度的物理过程;② 研究 CME 拓扑结构和加速过程主要依赖于日冕仪的观测数据,然而,

② 指等离子体中不同方向的磁力线断开再重新连接的过程,可将磁能向等离子体的动能和热能快速转化,有时亦可形象地称之为磁场湮灭。

为了获得好的观测效果,日冕仪总要遮挡住太阳附近的强光辐射,同时却也掩盖了 CME 起始和主要的加速区域;而且单点仪器的测量只能给出 CME 在天空平面上的投影速度;③在模型构建上,CME 和耀斑的三维本性和多时空尺度融合的物理本质,使得数值建模难度很大。这些困难的存在,使得太阳爆发的物理机制不可能在短期内研究清楚。

尽管如此,国际上有多颗空间探测卫星均以促进该课题的研究解决作为主要科学目标。例如,除了前面提及的 SOHO 卫星,2006 年 9 月和 10 月还相继发射了 Hinode(日出)卫星和 STEREO 卫星(日地关系观测台)。其中, Hinode 的主要科学目标是理解太阳磁场如何产生,能量如何由光球向上输运,以及这些能量是如何被爆发式释放的。而 STEREO 由两颗基本相同的子卫星组成,分布在地球的两侧,像人的两只眼睛一样,形成了针对太阳的立体观测视角,主要科学目标是理解导致太阳爆发的物理过程,跟踪 CME 的加速和传播的三维演化,研究高能粒子加速和太阳风三维结构等。另外,国际上还提出了若干更新的卫星探测计划,如计划于 2011 年发射的 SDO(太阳动力学观测台),2015 年发射的 Solar Orbiter(太阳轨道器)和仍在酝酿中的 Solar Probe Plus(太阳探针)计划等,国内科学家也提出了“夸父”计划和空间太阳望远镜在内的多个大型卫星项目。这些计划都具有更高时空分辨的观测能力和更新颖的观测设计,从而正在和将要为相关物理问题的深入研究和最终解决提供契机。

参 考 文 献

- [1] Crooker N, Joselyn J A, Feynman J. Coronal Mass Ejections, Geophysics Mongraph 99. Washington D C American Geophysical Union, 1997. 1-299.
- [2] Forbes T G. A review on the genesis of coronal mass ejections. J. Geophys. Res., 2000, 105: 23153-23165.
- [3] Gosling J T. The solar flare myth. J. Geophys. Res., 1993, 98: 18937-18950.
- [4] Lin J, Soon W, Baliunas S L. Theories of solar eruptions: a review. New Astronomy Rev., 2003, (47), 53-84.
- [5] Zhang J, Dere K P. A statistical study of main and residual accelerations of coronal mass ejections. ApJ, 2006, (649): 1100-1109.

撰稿人: 陈 耀

山东大学威海分校空间科学与物理学院, yaochen@sdu.edu.cn