

# 激光等离子体模拟研究日地磁场活动特征

董全力<sup>1,2</sup> 王首钧<sup>2</sup> 袁大伟<sup>2</sup> 陆全明<sup>3</sup> 黄灿<sup>3</sup> 刘勋<sup>2</sup> 李玉同<sup>2</sup> 林晓宣<sup>2</sup> 魏会冈<sup>4</sup> 仲佳勇<sup>4</sup>  
 施建荣<sup>4</sup> 江少恩<sup>5</sup> 丁永坤<sup>5</sup> 蒋彬彬<sup>5</sup> 杜凯<sup>5</sup> 华能<sup>10</sup> 乔占峰<sup>10</sup> 黄奎喜<sup>10</sup> 陈明<sup>10</sup>  
 贺贤士<sup>6,7</sup> 郁明阳<sup>7,8</sup> 刘全生<sup>9</sup> 王水<sup>3</sup> 唐永健<sup>5</sup> 朱健强<sup>10</sup> 赵刚<sup>4</sup> 盛政明<sup>2,11</sup> 张杰<sup>2,11\*</sup>

<sup>1</sup> 鲁东大学物理与光电工程学院, 山东 烟台 264205

<sup>2</sup> 中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190

<sup>3</sup> 中国科学技术大学中国科学院基础等离子体物理重点实验室, 安徽 合肥 230026

<sup>4</sup> 中国科学院国家天文台光学天文重点实验室, 北京 100012

<sup>5</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

<sup>6</sup> 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

<sup>7</sup> 浙江大学物理系聚变科学理论与模拟研究所, 浙江 杭州 310027

<sup>8</sup> 鲁尔大学理论物理研究所, 德国 波鸿 D-44780

<sup>9</sup> 马里兰大学帕克分校物理系, 美国 马里兰 University Park 20742

<sup>10</sup> 中国科学院高功率激光物理重点实验室, 上海 201800

<sup>11</sup> 上海交通大学物理系教育部激光等离子体物理研究重点实验室, 上海 200240

**摘要** 激光等离子体磁重联实验再现了卫星观测到的日地磁场活动特征。一方面, 实验再现了太阳冕区物质抛射及耀斑结构, 包括明亮的尖屋顶状环、具有微细结构的磁化等离子体团以及二者之间因为磁场拉扯而产生的二阶电流片。另一方面, 实验发现存在三个电子扩散区(EDR), 这与欧洲空间局 Cluster 卫星先后在 2003 年和 2005 年发现的分别处于地磁尾重联区中间部位及两侧分形线位置的两类 EDR 结构相似。所不同的是, 在激光等离子体磁重联实验中, 两类 EDR 在一次重联过程中产生, 但中心 EDR 出现时间晚于两侧 EDR, 且其发展速度更快, 喷流速度接近或者超过迎风 Alfvén 速度。通过对太阳耀斑附近、地磁尾重联区以及激光等离子体自生磁场重联区位置等离子体的参数比较, 显示三者在一定程度上具有 Euler-Alfvén 相似性, 这表明可以通过激光等离子体自生磁场的重联过程来研究其他两种等离子体中的磁重联现象。

**关键词** 实验室天体物理; 太阳冕区物质抛射; 太阳耀斑; 磁重联; 电子扩散区

中图分类号 O539 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.080013

## Laser-Plasma Experimental Simulations of activity of Solar Magnetic Fields and Earth's Magnetosphere

Dong Quanli<sup>1,2</sup> Wang Shoujun<sup>2</sup> Yuan Dawei<sup>2</sup> Lu Quanming<sup>3</sup> Huang Can<sup>3</sup> Liu Xun<sup>2</sup>  
 Li Yutong<sup>2</sup> Lin Xiaoxuan<sup>2</sup> Wei Huigang<sup>4</sup> Zhong Jiayong<sup>4</sup> Shi Jianrong<sup>4</sup> Jiang Shaoen<sup>5</sup>  
 Ding Yongkun<sup>5</sup> Jiang Baibin<sup>5</sup> Du Kai<sup>5</sup> Hua Neng<sup>10</sup> Qiao Zhanfeng<sup>10</sup> Huang Kuixi<sup>10</sup>  
 Chen Ming<sup>10</sup> He Xiantu<sup>6,7</sup> Yu Mingyang<sup>7,8</sup> Liu Quansheng<sup>9</sup> Wang Shui<sup>3</sup> Tang Yongjian<sup>5</sup>  
 Zhu Jianqiang<sup>10</sup> Zhao Gang<sup>4</sup> Sheng Zhengming<sup>2,11</sup> Zhang Jie<sup>2,11</sup>

收稿日期: 2013-07-14; 收到修改稿日期: 2013-07-19; 网络出版日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(11220101002, 11274152, 11074297)

作者简介: 董全力(1974—), 男, 教授, 主要从事激光等离子体加速器、实验室天体物理以及激光等离子体软 X 射线激光的产生和应用等方面的研究。E-mail: qldong@aphy.iphys.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: jzhangl@situ.edu.cn

- <sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264205, China
- <sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
- <sup>3</sup> Key Laboratory of Basic Plasma Physics of Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
- <sup>4</sup> Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
- <sup>5</sup> Research Center for Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
- <sup>6</sup> Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China
- <sup>7</sup> Institute for Fusion Theory and Simulation, Physics Department, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China
- <sup>8</sup> Institute for Theoretical Physics I, Ruhr University, D-44780 Bochum, Germany
- <sup>9</sup> Department of Physics, University of Maryland College Park, Maryland 20742, USA
- <sup>10</sup> Key Laboratory for High Power Lasers Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
- <sup>11</sup> Key Laboratory for Laser Plasmas of Ministry of Education, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Laser-plasma experiments about magnetic reconnection have been used to investigate characteristics of activities of the solar magnetic field and the magnetosphere. In our recent laser plasma experiments, two side-by-side thin target layers, instead of a single one, are used. It is found that at one end of the elongated current sheet (CS), a fanlike electron outflow region including three well-collimated electron jets appears. These laboratory experimental observations of three electron diffusion regions (EDRs) reproduce the characteristics of magnetic reconnection sites at the Earth's magnetotail, which was observed by the Cluster satellites in 2003 and 2005, separately. The higher than 1 MeV tail of the jet energy distribution exhibits a power-law scaling. The enhanced electron acceleration is attributed to the intense inductive electric field in the narrow electron dominated reconnection region, as well as additional acceleration as electrons are trapped inside the rapidly moving plasmoid formed in and ejected from the CS. The plasmoid ejection also induces a secondary CS. The experimental results mimic the formation process of solar coronal mass ejections and flares, and also confirm the theory and model predictions about the CS-born anomalous plasmoid as the initial stage of coronal mass ejections, and the behavior of moving-away plasmoid stretching the primary reconnected field lines into a secondary CS conjoined with two bright ridges identified. We compare the parameters of plasmas in the transition region between solar corona and chromosphere, at the reconnection site of the magnetotail, and that produced by the giant lasers, and find that all three plasma systems have Euler-Alfvén similarity, meaning that the physics underlying current laser-plasma phenomena can be applicable to that of solar flares and substorms of magnetosphere.

**Key words** laboratory astrophysics; solar coronal mass ejection; solar flares; magnetic reconnection; electron diffusion region

**OCIS codes** 000.2190; 130.5440; 110.7440

## 1 引言

等离子体普遍存在于天体与空间环境之中,因此对空间物理以及天体物理的研究与等离子体物理研究紧密地结合在一起。空间和天体物理研究的目的在于拓展人类对宇宙的认识,而等离子体物理研究的目的则在于获得对具体等离子体特性和规律的认识。许多空间和天体物理问题均需要等离子体物理来解释,而空间和天体的观测则为等离子体物理研究提供了相当多的极端条件下研究对象和丰富的研究数据。随着一些高能密度物理实验装置的建成,已经能够在实验室中获得与部分天体环境近似的物理条件,人们试图在实验室中通过可控的实验条件研究天体物理现象,从而建立起对天体物理的直觉。即便不能在实验室中重复天体环境的物理条件,通过精心设计实验依然可以向人们展示在相似的非线性相互作用过程中系统会表现出何种特征。更多的时候,人们发现一种天体物理现象既不能用理论模型也不能靠数值模拟来解释,尤其是当这些现象为多种物理过程混杂的时候;通过在实验室中有目的地添加这些物理条件,人们可以验证对天体现象中所包含物理的理解。天体物理学家还将实验室作为设备建设以及模型程序检验的地方。

在神光二号(SG II)激光实验平台上开展的等离子体自生磁场重联(MR)实验以太阳冕区物质抛射及耀斑为主要模拟研究对象。实选择这个研究对象有两个原因,一则太阳是离人类最近的一个恒星,也是对人类生产

生活活动影响最大的恒星。二则,作为高能量密度的研究对象,太阳活动剧烈,现象明显,对探测要求低,对其研究相对较容易;对其观测与研究历史久远,研究资料丰富,研究理论相对成体系。而 SG II 作为主要的实验室天体物理研究平台主要是因为千焦级激光等离子体的对磁重联研究有以下优点:1)千焦级激光等离子体具有高能量密度,因而所产生的信号强度高,现象明显,易于探测;2)激光等离子体体积小,等离子体演化过程时间尺度短,而且均在已有的等离子体诊断装置的精确测量范围内,易于全域地、全过程地诊断监测;3)激光等离子体多是在较大的真空腔室中,受边界条件影响小,而且研究需要时,可以容易地添加边界条件。

太阳耀斑是在太阳的色球-日冕过渡层中发生的一种局部辐射突然增加的太阳活动。其下部多位于色球层,形成色球爆发,其上部则经常被发现与冕区物质抛射相关。耀斑发生的位置,等离子体被加热至千万度,电子、质子及少量重离子被加速到接近光速,这些高能粒子所辐射的电磁波谱覆盖长波微波至  $\gamma$  射线。耀斑所产生的广谱电磁辐射以及高能粒子可影响地球大气层中的电离层,破坏人类的生活生产活动。

现在人们已经知晓太阳耀斑的能量主要来自于其准静态磁场能量(虽然人们并不清楚太阳磁场的来源)的释放,即磁场能通过重联过程向等离子体机械能的转换。利用磁场重联物理理论解释太阳耀斑现象由 Giovanelli<sup>[1]</sup> 在 1946 年提出,并由后续的多位学者逐步完善<sup>[1-3]</sup>,但其细致特征的观测则直到 20 世纪 90 年代初日本的太阳卫星 Yohkoh 发射并运行之后才成为可能<sup>[4]</sup>。Yohkoh 卫星携带的软 X 射线谱仪(SXS)以及硬 X 射线望远镜(HXT)为人们提供了第一批太阳活动 X 射线照片<sup>[5-6]</sup>。最先证明太阳耀斑是由太阳磁场重联过程产生的观测结果是持续时间较长的耀斑 X 射线结构图<sup>[7]</sup>。即卫星观测到的尖屋顶状结构。这类结构,正好符合方向相反磁场重联结构的特征。而具有较短持续时间的太阳耀斑的形成物理机制,直到 Yohkoh 观测到了环顶硬 X 射线源后才确认也是由太阳磁场重联产生的。其基本的物理过程是:在耀斑产生之前,磁重联就已经发生,在重联区两端产生了闭合的磁场;随后发生的耀斑,则是因为重联进程加快,产生的高能喷流与此前产生的闭合磁场及其束缚的等离子体碰撞,在其上端产生冲击波,导致环顶硬 X 射线及高温区域;更有相当多的电子在冲击波中加速,并沿着磁场线到达色球表面并与该处等离子体碰撞,产生了环足硬 X 射线源。

太阳冕区物质抛射与太阳耀斑紧密相关。日冕物质抛射是指太阳的日冕层中的等离子体(主要是由电子、质子及少数较重的离子组成的)以及固结其中的日冕磁场被高速抛射出来,是太阳系内规模最大、程度最剧烈的能量释放过程。当抛射物质到达地球时,会扰乱地球磁层,压缩其向日面,并延伸背日面地磁成尾状,使其发生磁重联,产生高能粒子,从地球后方倾入上层大气,造成特别强的极光。

通过对太阳耀斑、太阳高能粒子辐射、以及太阳冕区物质抛射等观测现象进行统计分析,人们发现,日冕物质抛射事件伴随着耀斑与高能粒子的产生。现在人们普遍认为这些观测现象应该是太阳磁场的同一种剧烈活动的不同表现。但由于探测手段的局限性,比如人们观测以上三种现象需要分别利用工作在不同电磁波段/能段的设备,而且观测对象往往处在不同的位置,因此在得到上述结论的时候,只能通过推理将各种分立的观测联立起来。为了能够更好地理解有关的太阳活动,人们建立了各种模型。但这些模型多是基于一个或者多个前提假设,而且是描述性的,一个观测过程往往有多个模型可以解释,缺乏严格自洽的数学推导。模型中所揭示的物理规律,也还需要实验的检验。

在 SG II 实验平台上,通过构造合适的拓扑结构,我们尝试再现太阳活动中观测到的现象,并在此基础上进一步研究太阳现象背后的磁重联物理机制。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。将 SG II 装置产生纳秒脉冲激光聚焦至  $10^{14} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ ,辐照在平面靶上后产生两团水平并列排布的等离子体团,二者之间的间距可调,一般在  $400 \sim 800 \mu\text{m}$  范围内。由于等离子体的温度与密度梯度方向极端不一致,从而产生热电动势并引发热电流,最终诱发环形的高达兆高斯量级的自生强磁场。在激光脉冲的持续时间内,这个自生磁场是准稳态的,“冻结”在激光等离子体表面,并随之膨胀扩散。在两团等离子体之间,磁场方向相反,构成了一个理想的磁重联结构,而等离子体及其自生磁场的膨胀速度决定了该处磁场重联的特征。磁重联区的 X 射线辐射特征主要通过针孔相机、分幅相机、以及晶体谱仪加以测量;等离子体密度分布与演化特征则通过 Normaski 干涉谱仪测量;另外,实验还利用偏振成像

装置来测量磁重联区自发辐射的结构特征。

### 3 实验结果

#### 3.1 对太阳冕区物质抛射、耀斑及高能粒子能谱的再现

为了研究磁重联过程中等离子体喷流的特性,在激光平面靶下方合适位置加上了一个铜块作为示踪靶<sup>[8]</sup>。两团等离子体之间的自生磁场发生重联时,等离子体喷流预期将沿着靶面,在垂直于两个激光焦斑连线的方向上出射,并与示踪铜靶碰撞,产生 X 射线亮斑。如图 2(b)所示,在示踪铜靶处在预期磁重联等离子体喷流路径上的位置,由于碰撞,产生了一个明亮的光斑。这个实验结果与日本 Yohkoh 卫星观测到的环顶硬 X 射线源[图 2(a)]从图像上很相似<sup>[4]</sup>。但有必要澄清二者之间的一些差别。重要的一点是,激光等离子体实验是以固体铜靶模拟太阳磁环约束的等离子体结构。因此,即使磁重联喷流与靶碰撞产生了冲击波及高能电子,也不存在高能电子沿磁场线传输至他处的这个环节,因而并不能产生太阳耀斑产生的所谓磁环足硬 X 射线源。

然而,在激光等离子体磁场重联实验中,的确可以产生如太阳耀斑中的尖屋顶状明亮结构[图 2(c)],与之相连的,是一个二阶电流片(CS)层<sup>[9]</sup>。这两个结构是由两团激光等离子体之间的磁场重联过程产生的一个等离子体团快速离开,拉扯其周围磁场而产生的[图 2(d)]。实验结果的示意图及说明在图 2(e)中给出。

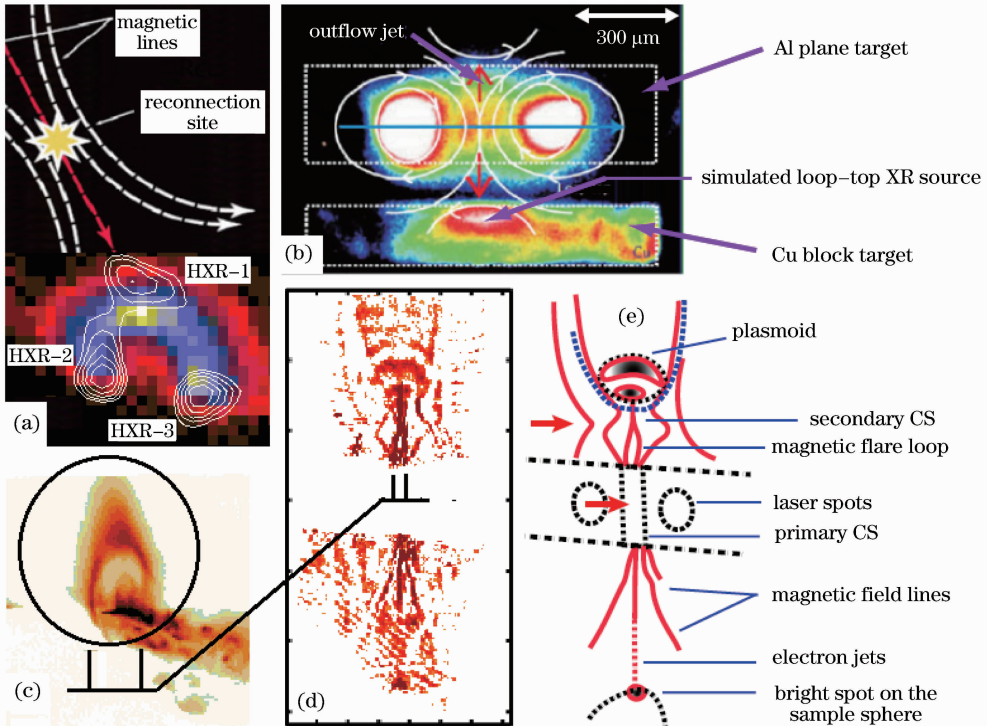


图 2 太阳耀斑观测及实验结果对比。(a)太阳耀斑中的磁环顶和磁环足硬 X 射线源;(b)SG-II 激光等离子体实验模拟 (a);(c)持续时间较长的太阳耀斑的尖屋顶状 X 射线图像;(d)SG-II 激光等离子体磁重联区偏振自发辐射成像;(e) (d)的示意图,图中各个元素均做了标注

Fig. 2 Comparisons between solar flares and experimental results. (a) Loop-top and loop-foot hard X-ray sources in compact solar flares. (b) results of magnetic reconnection experiments on SG II simulating the loop-top hard X-ray source (a); (c) giant arch observed in X-ray solar flares of long-duration; (d) image of the laser-plasma MR region recorded with the polarized self-emission; (e) schematic graph of (d) with each component marked

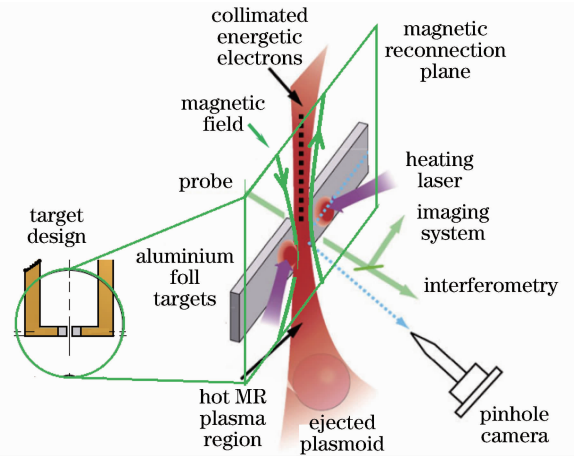


图 1 实验布局及靶示意图

Fig. 1 Experimental setup with target design

在等离子体团中存在两个较明亮的区域,其一是与下部二次电流片相连的部分,是由二次电流片加速的高能电子与等离子体团碰撞产生的;其二是等离子体团的上部,是由等离子体团在飞离其产生地的过程中与周围等离子体的碰撞产生的。当然,等离子体团的产生与出射过程还需要更进一步的研究。模拟研究显示,在重联区电流片长度增长的过程中会变得不稳定,而等离子体团的产生则是磁场重联区结构不稳定的必然结果<sup>[10-11]</sup>。

等离子体团的快速移动,拉扯周围的磁场,并在周围等离子体的共同作用下产生了第二阶的重联区(二阶电流片,激光焦点连线中点附近的区域为主磁重联区)。由于等离子体中准静态磁场能的快速释放加热了等离子体,加速了该处的粒子;高温等离子体沿着磁重联分形线强磁场传输,形成了明亮的尖屋顶结构。将二阶电流片的形成机理归结为等离子体团对周围磁场的拉扯的合理性可以由其附近的明亮曲线结构特征所证明。磁场重联区分形线一端仍然分布在明亮尖屋顶结构足部的两侧,在其远离主磁重联区的位置仍然保持为扇形区的边缘,但在其中间部分,也就是在二阶电流片位置,却出现了相向弯曲结构。这个结构特点,与太阳卫星 Yohkoh 上 SXS 观测到的太阳耀斑以及冕区物质抛射结构[图 2(c)]极为相似。为了能够更清晰地说明这一点,将实验结果图 2(c)与 Lin 等<sup>[12]</sup>的太阳冕区物质抛射机理示意图的构成元素做了对比。可以看出,激光等离子体磁重联实验中观测到的等离子体团抛射现象与已有的太阳冕区物质抛射现象具有几乎相同的结构特征,因而也就证明了该模型的物理准确性。虽然该模型在太阳等离子体团的形成上没有给出一个自洽的解释,但如果考虑到 Uzdensky 等<sup>[11]</sup>关于细长重联区的不稳定、能够产生尺寸与重联区宽度相当等离子体团的理论预言,则激光等离子体磁重联实验结果在一个小尺度上重现了太阳冕区物质抛射以及耀斑的产生与发生过程。

激光等离子体磁重联实验也产生了能量呈幂指数分布的高能电子束<sup>[13]</sup>。图 3 给出了产生磁化等离子体团的具有“双 Y 型”结构的磁重联过程,以及没有产生等离子体团的“X 型”磁重联过程两种情形下的电子能谱。可以看出,由于等离子体团的产生,电子被加速的数量更多。根据冲击波 Fermi 加速模型,将粒子加速到  $\epsilon_{\max}$  所需要的时间是  $\tau_{\text{acc}} \approx 6.7 \eta c \epsilon_{\max} / Z_e B V_{\text{sk}}^2$ ,其中  $Z_e$  是粒子电荷,  $V_{\text{sk}}$  是冲击波速率,  $\eta$  是描述磁场扩散的参数。对于太阳冕区等离子体参数,考虑磁扩散参数  $\eta$  在  $1 \sim 10^4$  范围,电子需要几秒到几分钟的时间才能被加速到  $0.1 \sim 10$  MeV。这与实际观测到的太阳耀斑持续时间以及太阳高能电子能量相当,表明在此类太阳活动过程中, Fermi 加速模型适用。但在实验中,如果是 Fermi 加速模型主导高能电子的加速过程,则即便是磁扩散系数取 Bohm 扩散,即  $\eta_{\text{Bohm}} \approx 1$ ,要获得能量在兆电子伏量级的电子加速,也还需要几十纳秒甚至微秒级的加速时间。因此在激光等离子体磁重联实验中,高能电子的加速需要更有效的加速方式。已有的数值模拟显示,在存在单一 X-line 的磁重联拓扑结构中,电子可以被重联电场加速到极高能量<sup>[14]</sup>。对于处在静止状态的电子,要将其在 100 ps 的时间内加速到兆电子伏量级的能量,需要的加速梯度约为  $10^8$  V/m,加速距离在 1 cm。SG II 激光等离子体的自生磁场重联区磁场的大小在  $(3.5 \sim 4) \times 10^6$  Gs 之间(见 3.2 节)。则根据法拉第定律  $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ ,达到以上条件,需要磁场重联效率在  $0.1 \sim 0.3$ ,这与通过磁重联区张角  $\theta_{\text{rec}}$  计算得到重联率是一致的,即有  $\tan \theta_{\text{rec}}$  约为  $0.25 \sim 0.35$ 。至于约 1 cm 的加速距离,则只有被加速电子反复进入加速电场的时候才有可能。这就意味着,重联电场和磁场,尤其是等离子体团磁场共同形成了一个回旋加速器。电子正是被这样一个高效的回旋加速器加速至兆电子伏量级的能量。

### 3.2 对地磁尾重联区特征的再现

太阳抛射的物质到达地球,并与地球磁场相互作用,在向日面压缩磁场,而在背日面则拉伸磁场,并于地磁尾形成重联区,产生高能粒子,从地球背日面沿磁场线侵入上层大气,产生绚丽的极光。因此,地球磁圈也是一个天然的研究磁重联物理的实验室。与太阳磁场活动监测不

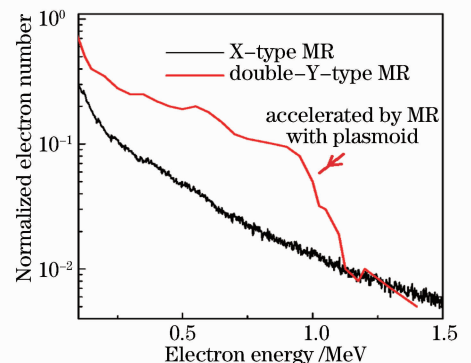


图 3 X 型磁重联区与双 Y 型不稳定磁重联区(形成等离子体团)产生的高能电子能谱

Fig. 3 Energy distributions of electrons produced from X-type MR and Y-type MR

同之处在于,对太阳监测的卫星因为监测对象的高温,需要远离监测对象;而监测地磁尾重联过程的卫星则可以深入到重联区内,获取各种参数。此类卫星包括欧洲空间局的 Cluster 卫星。

Phan 等<sup>[15]</sup>报导了欧洲空间局 Cluster 卫星在 2003 年观测地磁尾重联区时在其中心位置发现的一个长度达到 60 倍离子惯性长度,宽度达 9 倍电子惯性长度的电子扩散区(EDR),或者叫电子喷流。这个发现,与 Shay 等<sup>[16]</sup>利用 PIC(Particle-in-cell)模拟所得到的结果是符合的。但这个发现迄今仅有一例。而 Mozer 等<sup>[17]</sup>在 2005 年报道的地磁尾重联区中的 19 对电子扩散区则分布在重联区两侧,沿着重联分形线或称分形面。我们的激光等离子体磁重联实验结果显示,这两组完全不同的观测结果可能是由两类原因造成的。一类是两次观测的磁重联过程属于不同类型:1)是强驱动磁场重联过程,这种过程中,既会产生两侧的电子扩散区,也会产生中心的电子扩散区,但中间电子扩散区与两侧电子扩散区或许不是在同一平面上,这也是 Cluster 卫星仅观测到中心 EDR,而没有观测到两侧 EDR 的第二个可能的原因;2)是自发重联过程,则往往仅产生沿着分形线的两个 EDR。

这两种磁场重联情形在激光等离子体磁重联实验中均观测到了。图 4(a)和 4(b)给出是激光等离子体磁重联区附近的干涉图片。探针光相对于加热激光后沿的时间延迟分别是 0 和 1 ns。在稍早时刻,两团等离子体之间发生了磁重联,产生了沿着重联分形线的两个边侧电子扩散区;1 ns 时,两侧电子扩散区进一步加长,而且重联区中间出现了第三个电子扩散区——中心 EDR,且其长度与两侧 EDR 相当。图 4 以及图 2(d)均能够给出磁重联区的许多性质。激光等离子体的电子惯性距离为  $d_e = c/\omega_{pe} = 0.8 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ,离子的惯性距离为  $d_i = c/\omega_{pi} = 54 \sim 75 \mu\text{m}$ 。根据 X 射线针孔相机测定的磁重联区的宽度约为  $85 \mu\text{m}$ ,约为离子惯性距离的 1.5 倍;然而,实验中电子扩散区宽度的测量有相当的难度,采用的光学测量方法依赖于光子的能量。实验采用的 X 射线针孔相机所测量的光子能量大于 1.5 keV,波长短于 1 nm;在接近重联区中心的位置,两侧电子扩散区的宽度是  $7 \sim 15 \mu\text{m}$ ,是电子惯性距离的 10~15 倍;实验在可见光波段测得的远离电子扩散区宽度约在  $55 \mu\text{m}$  [图 2(d)及图 4]。这个结果也表明,电子扩散区的中心位置的温度要远大于其边缘位置的温度。实验中,激光等离子体的电子自由程为  $\lambda_{eMFP} \approx 114 \mu\text{m}$ ,大于测得的磁重联区宽度;而且离子惯性距离与磁重联区的 Sweet-Parker 宽度<sup>[16]</sup>比值有  $d_i/d_{sp} \approx 10 > 1$ ,因此,碰撞效应在实验中的磁重联过程中可以忽略,霍尔效应在重联过程中起到主导作用。从图 4 可以计算出,两侧的 EDRs 增长速率约为 600 km/s;相比较而言,出现较晚的中心 EDR 的增长速率会更高。我们还通过图 4 的干涉图获得重联区密度约为  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;通过 Al 等离子体自发辐射谱计算出等离子体的温度约在 450 eV。而且可以通过图 4 及图 2(d)中估算出磁场强度。图 2(d)为磁重联区的水平偏振窄带宽同步辐射成像,记录波长为  $532 \pm 2 \text{ nm}$ 。最高能量与其同步辐射波长之间的关系是  $\epsilon_{\text{max}} = m_e c^2 (2.5 \times 10^{-2} / \lambda_{\text{max}} B_0)^{1/2}$ ,若假设图像 EDR 的宽度就是电子的回旋直径,则有  $r_g = 1.70 \times 10^3 \sqrt{(\epsilon_{\text{max}}/0.5)^2 - 1} / B_0 = 55 \mu\text{m}$ 。可以获得  $\epsilon_{\text{max}} = 5 \text{ MeV}$ ,  $B_0 \approx 3.8 \text{ MGs}$ 。这个等离子体参数对应的 Alfvén 速度约在 700 km/s。这就是说,电子扩散区或者电子喷流的速度接近或者超过了所在位置等离子体的迎流 Alfvén 速度。这一实验结果证明了 Shay 等<sup>[16]</sup>的 PIC 模拟预言,也是第一次完整地观测到磁重联过程中超 Alfvén 速度的喷流。

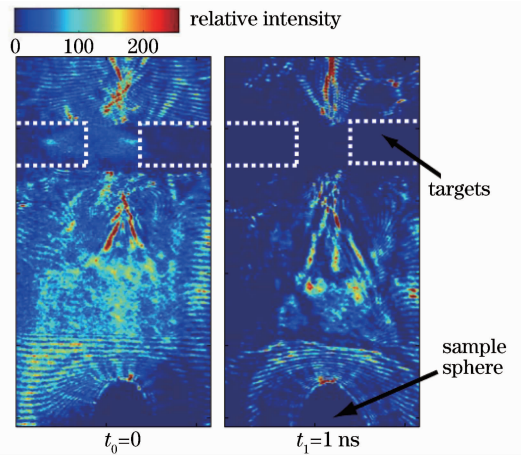


图 4 双 Y 型不稳定磁重联区(形成等离子体团)的时间演化特点

Fig. 4 Evolution of the double-Y-type MR region unstable with plasmoids generated

## 4 讨 论

上述实验结果表明,不同特性的等离子体可以呈现出相同的现象,或者说,不同参数的等离子体在一定

条件下具有相同的演化过程。很明显,在不同参数范围的等离子体系统之间存在着较为精确的定标关系。Ryutov 等<sup>[18-19]</sup>在 1999 年与 2000 年先后提出了理想流体和磁流体标度变换理论。该理论将不同特征,但满足相同(磁)流体方程的等离子体系统通过标度变换公式等价起来,这样可以在实验室利用小尺度的(磁)流体来研究大尺度的天体(磁)流体相关现象。

对于一个等离子体系统,若可以被看作理想的磁流体以便可以利用 Euler-Alfvén 方程组加以描述。则要求:1)构成成分需要保持局域化,任何非局域的能量或者物质传输均不发生;2)任何耗散机制(或者能量转化方式)均可以忽略;3)系统不能有外加的或者内生的源。对于 1),需要通过等离子体成分之间的碰撞或者磁化来实现,即成分的自由程或者拉莫尔半径要远远小于系统的特征尺寸。等离子体中的耗散过程主要包括热传导、粘滞和欧姆耗散等。耗散机制在等离子体演化过程中所起的作用,可以利用无量纲参数,如 Peclet 数  $Pe = uL/\kappa$ ,磁 Reynolds 数  $Re_M = uL/D_M$  等参数加以评估,其中  $u, L$  分别是系统的速度和特征长度, $\kappa$  和  $D_M$  分别是热及磁扩散系数。当描述理想磁流体的 Euler-Alfvén 方程以及描述具体现象(包括部分耗散现象)的边界条件方程存在线性变化不变性时,其所描述的多个等离子体系统之间可以建立起直接的对应关系。

我们开展本研究的目的是利用激光等离子体模拟研究日地磁场及等离子体的活动。实验结果(图 4)一方面再现了太阳冕区物质抛射及耀斑结构,包括明亮的尖屋顶状 X 射线环、具有微细结构的磁化等离子体团以及二者之间因为磁场拉扯而产生的二阶电流片;另一方面,实验结果发现了三个电子扩散区,这与欧洲空间局 Cluster 卫星在地磁尾发现的两类电子扩散区相似,但地磁尾部的中心与两侧电子扩散区是分别于 2003 年与 2005 年发现的,而激光等离子体实验中,两类 EDR 是在一次重联过程中产生的,但中心 EDR 出现时间晚于两侧 EDR,且其发展速度更快。有必要指出的是,在地磁尾重联区也会产生磁化等离子体团<sup>[20]</sup>,但该等离子体团的移动并没有产生明亮的结构,主要是因为该处能量密度较低。

由此可见,太阳磁场、地球磁球以及激光等离子体磁场均可以产生相似的现象。我们收集、测量并计算了这三种等离子体的参数性质,以及反映其中物理过程相对重要程度的无量纲参量,结果如表 1 所示。表中  $\omega_{pi}$  为等离子体声波频率, $\omega_{pe}$  为等离子体朗缪尔波频率, $V_{eA}$  为电子阿芬尔速度, $V_{iA}$  为离子阿芬尔速度, $V_{A, inflow}$  为迎流等离子体阿芬尔速度, $B_L$  为日地磁场 LMN 坐标中指向地球的磁场分量, $B_M$  为日地磁场 LMN 坐标日地平面内的磁场分量。EDR 为电子扩散区, IDR 为离子扩散区。三种等离子体的 Peclet 数均远大于 1,说明在这三种等离子体中的流体效应(对流过程)占主导地位,而粒子的热扩散效应相对较小,在太阳磁场以及地球磁球中,甚至可以忽略;其磁 Reynolds 数也均远大于 1,表明磁平流效应远大于磁扩散效应,即欧姆耗散机制可以忽略。虽然三种等离子体均可以由线性变换不变的 Euler-Alfvén 方程加以描述,其演化特征存在相似之处,但在细节上三个过程还是有差别的,比如实际测量到的磁重联区宽度与长度以及电子扩散区的长度与等离子体其他特性的关系等等。这些细节上的差别,或许可以归结为不同等离子体磁重联拓扑具有不同的结构细节。毕竟,虽然人们可以利用诸如 PIC 等数值模拟工具给出部分实验结果或者观测结果的解释,但还没有一个较为完整的磁重联理论来预言细致的实验与观测结果。

## 5 结束语

通过对激光等离子体、太阳色球-冕区过渡层等离子体、以及地磁尾重联区等离子体的性质进行相似性比较,发现三者之间满足 Ryutov 的 Euler-Alfvén 相似;也就是说,人们可以通过激光等离子体再现与其他两者相似的现象以及演化过程。激光等离子体磁重联实验也证明了这一点。实验产生了一个磁化等离子体团,当它快速离开其产地的时候,牵扯周围的磁场产生二阶电流片,并加热已经重联的磁场所约束的等离子体,形成尖屋顶状明亮结构;磁化等离子体团本身也具有较细致的结构。虽然激光等离子体磁重联结构是利用可见光测得的,但再现了太阳冕区物质抛射及耀斑特征。激光等离子体磁重联实验也在重联区产生了三个电子扩散区,类似于 Cluster 卫星先后于 2003 年和 2005 年在地磁尾扇形重联区中间位置以及边缘位置发现的两类电子扩散区。实验表明,人们可以利用激光等离子体磁重联实验来模拟研究日地磁场以及其他天体磁场的活动特征。

表1 几种等离子体参数比较  
Table 1 Parameters of different plasmas

Items		PIC, Hall-MHD	MRX	Astro-observations		Laser-plasma
				Solar	Magneto-sphere	
IDR	Width		~5 EDRs	$10^4$ km,	$(1\sim 16)c/\omega_{pi}$	$(1\sim 10)c/\omega_{pi}$
	Length	/	/	not DR per se		
EDR	Width		$5\sim 8c/\omega_{pe}$ (center, inner)	/	Sides	$N \times 0.4c/\omega_{pe}$
		Inner $\Delta$	$(1\sim 2)c/\omega_{pi}$	/	Center	$9c/\omega_{pe}$
	Length	Outer $D$	/	/	$63c/\omega_{pi}$ (center)	
EDR flow velocity			$(0.12\sim 0.16)V_{ea}$	$>1.0V_{IA}$	$(1.2\sim 1.5)V_{A, \text{inflow}}$ or $\sim V_{ea}$	$\sim 1.0V_{IA}$
Plasmoids		Multi in long MR	Observed O- and Y- shaped diffusion region	Multi- CME-s	Observed with bipolar $B_z$ , possible intense core $B_{30^\circ}$ with energetic flow	Single observed
Magnetic strength /Gs			300~600	$1\sim 10^3$	Size	$3.1 \times 1.7c/\omega_{pi}$
Density /cm <sup>-3</sup>			$(0.5\sim 2) \times 10^{14}$	$10^9\sim 10^{11}$		$\sim 10^6$
Temperature /eV			10~30	~100		$10^{18}\sim 10^{20}$
Pressure /Pa			$\sim 10^3$	$10^{-3}\sim 10^2$		400
$\beta$			<1	$0.01\sim 2$		$\sim 10^8$
Lundquist number $S$		$10^3\sim 10^8$	$10^2\sim 10^3$	$\sim 10^{12}$		$0.1\sim 10$
Life period			~1 ms	Minutes to hours	Minutes to hours	$\sim 100\sim 500$
Characteristic scales			100 cm, $\sim 5c/\omega_{pi}$	~ $10^5$ km	~500 km	<100 ps
Velocity /(km/s)			100	$10\sim 10^9$	$10^2\sim 10^3$	cm
Euler number				$0.01\sim 10$	$0.1\sim 10$	$10^2\sim 10^3$
Peclet number				$10^7$		$0.1\sim 10$
Collisionality				Non	Non	1~100
Radiation flux				/	/	Non
Magnetic Reynolds number				$10^8$	$10^5\sim 10^{10}$	/
						500



**致谢** 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心参加实验的同事以及制靶中心所有工作人员给予的帮助;感谢中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光与物理国家重点实验室的所有靶场工作人员及激光系统工作人员在实验过程中给予的配合与帮助。

### 参 考 文 献

- 1 R G Giovanelli. A theory of chromospheric flares[J]. *Nature*, 1946, 158(4003): 81–82.
- 2 E N Parker. Sweet's mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids[J]. *J Geophys Res*, 1957, 62(4): 509–520.
- 3 P Sweet. in B Lehnert, (ed.) *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1958. 123–126.
- 4 Y Ogawara, T Takano, T Kato, *et al.*. The SOLAR-A mission: an overview[J]. *Sol Phys*, 1991, 136(1): 1–16.
- 5 T Kosugi, K Makishima, T Murakami, *et al.*. The hard X-ray telescope (HXT) for the SOLAR-A mission[J]. *Sol Phys*, 1991, 136(11): 17–36.
- 6 S Tsuneta, L Acton, M Bruner, *et al.*. The soft X-ray telescope for the SOLAR-A mission[J]. *Sol Phys*, 1991, 136(11): 37–67.
- 7 S Tsuneta, H Hara, T Shimizu, *et al.*. Observation of a solar flare at the limb with the YOHKOH soft X-ray telescope [J]. *Pulbs Astr Soc Japan*, 1992, 44(7): L63–L69.
- 8 J Y Zhong, Yutong Li, Xiaogang Wang, *et al.*. Modelling loop-top X-ray source and reconnection outflows in solar flares with intense lasers[J]. *Nature Phys*, 2010, 6(10): 984–987.
- 9 Quanli Dong, Shoujun Wang, Quanming Lu, *et al.*. Plasmoid ejection and secondary current sheet generation from magnetic reconnection in laser-plasma interaction[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(21): 215001.
- 10 L S Shepherd, P A Cassak. Comparison of secondary islands in collisional reconnection to hall reconnection[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(01): 015004.
- 11 D A Uzdensky, N F Loureiro, A A Schekochihin. Fast magnetic reconnection in the plasmoid-dominated regime[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(23): 235002.
- 12 J Lin, Y-K Ko, L Sui, *et al.*. Direct observations of the magnetic reconnection site of an eruption on 2003 November 18 [J]. *Astrophys J*, 2005, 622(4): 1251–1264.
- 13 Q L Dong, D W Yuan, S J Wang, *et al.*. Energetic electron generation by magnetic reconnection in laboratory laserplasma interactions[J]. *J Plasma Phys*, 2012, 78(4): 497–500.
- 14 J F Drake, M A Shay, W Thongthai, *et al.*. Production of energetic electrons during magnetic reconnection[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(9): 095001.
- 15 T D Phan, J F Drake, M A Shay, *et al.*. Evidence for an elongated ( $>60$  ion skin depths) electron diffusion region during fast magnetic reconnection[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(25): 255002.
- 16 M A Shay, J F Drake, M Swisdak. Two-scale structure of the electron dissipation region during collisionless magnetic reconnection[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(15): 155002.
- 17 F S Mozer, S D Bale, J P McFadden, *et al.*. New features of electron diffusion regions observed at subsolar magnetic field reconnection sites[J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(24): L24102.
- 18 D Ryutov, R P Drake, J Kane, *et al.*. Similarity criteria for the laboratory simulation of supernov hydrodynamics[J]. *Astrophys J*, 1999, 518(2): 821–832.
- 19 D Ryutov, R P Drake, B A Remington. Criteria for scaled laboratory simulations of astrophysical MHD phenomena[J]. *Astrophys J Sup*, 2000, 127(7): 465–468.
- 20 R Wang, Q Lu, A Du, *et al.*. In situ observations of a secondary magnetic island in an ion diffusion region and associated energetic electrons[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(17): 175003