

激光驱动磁重联过程中的喷流演化和电子能谱测量

张凯 仲佳勇 裴晓星 李玉同 阪和洋一 魏会冈 袁大伟 李芳 韩波 王琛 贺昊 尹传磊 廖国前方远 杨骥 远晓辉 梁贵云 王菲鹿 朱健强 丁永坤 张杰 赵刚

Measurement of jet evolution and electron energy spectrum during the process of laser-driven magnetic reconnection

Zhang Kai Zhong Jia-Yong Pei Xiao-Xing Li Yu-Tong Sakawa Youichi Wei Hui-Gang Yuan Da-Wei Li Fang Han Bo Wang Chen He Hao Yin Chuan-Lei Liao Guo-Qian Fang Yuan Yang Su Yuan Xiao-Hui Liang Gui-Yun Wang Fei-Lu Zhu Jian-Qiang Ding Yong-Kun Zhang Jie Zhao Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 165201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.165201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.165201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光驱动的冲击波自生磁场以及外加磁场的冲击波放大研究

Shock wave amplification by shock wave self-generated magnetic field driven by laser and the external magnetic field

物理学报.2015, 64(10): 105202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105202>

实验室天体物理的验证特例:W43A 磁喷流

W43A Jet: strongly related to the magnetic field testified in laboratory

物理学报.2014, 63(14): 145201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.145201>

强激光与细锥靶相互作用产生强流高能电子束的研究

Numerical studies on intense laser-generated relativistic high-energy electrons via a thin cone target

物理学报.2013, 62(13): 135202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.135202>

超短超强激光导引及对电子加速的影响

Ultra-short ultra-intense laser guiding and its influence on electron acceleration

物理学报.2012, 61(16): 165201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.165201>

激光驱动磁重联过程中的喷流演化和 电子能谱测量*

张凯¹⁾²⁾ 仲佳勇^{3)†} 裴晓星¹⁾²⁾ 李玉同⁴⁾ 阪和洋一⁵⁾ 魏会冈¹⁾
袁大伟¹⁾ 李芳⁴⁾ 韩波¹⁾ 王琛⁶⁾ 贺昊⁶⁾ 尹传磊⁴⁾ 廖国前⁴⁾
方远⁷⁾ 杨骥⁷⁾ 远晓辉⁷⁾ 梁贵云¹⁾ 王菲鹿¹⁾ 朱健强⁸⁾
丁永坤⁹⁾ 张杰⁷⁾ 赵刚¹⁾

1)(中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台),北京 100012)

2)(中国科学院大学,北京 100049)

3)(北京师范大学天文系,北京 100875)

4)(中国科学院物理研究所,北京 100190)

5)(大阪大学激光工程研究所,大阪 565-0871,日本)

6)(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所,上海 201800)

7)(上海交通大学物理学院,上海 200240)

8)(高功率激光物理联合实验室,上海 201800)

9)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,绵阳 621900)

(2015年1月30日收到;2015年3月14日收到修改稿)

利用神光II激光器和日本大阪大学Gekko激光器构建了激光驱动等离子体磁重联过程.在垂直于磁重联平面方向发现了高速喷流,从不同观测方向实验证实了该喷流的存在并测量了喷流的流体力学演化过程,对其中的电子能谱进行了诊断分析.

关键词: 磁重联, 电子加速

PACS: 52.38.Fz, 52.35.Vd

DOI: 10.7498/aps.64.165201

1 引言

等离子体磁重联是一种磁场拓扑结构发生变化的现象,具体表现为相互靠近且具有相反分量的磁感线发生断裂和重新连接.在这个过程中磁能转换为等离子体的热能和动能^[1-3].太阳耀斑爆发和磁层亚暴中的能量转换普遍被认为和磁重联有密切的关系^[4,5].磁重联伴随着等离子体的加热和

加速等现象^[6],对等离子体研究具有非常重要的意义.以太阳耀斑为例^[7],在发生太阳耀斑期间,往往有很强的电磁波辐射和高能粒子产生,粒子再经过日冕物质抛射驱动的激波加速后,能量范围达到 10^3-10^9 eV.粒子加速是耀斑能量释放的一个重要特征,从磁重联区域释放的非热电子和部分粒子向下注入到耀斑环中,经过沉降、俘获、逃逸、碰撞、辐射、热化等过程,并伴随有丰富的爆发现象,例如,高能电子产生射电爆发、硬X射线、 $H\alpha$ 波段的爆发

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2013CBA01503)、国家自然科学基金(批准号:11205015,11273033,11135012)和北京科技新星(批准号:Z131109000413050)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jyzhong@bnu.edu.cn

等, 高能质子、离子等产生 γ 射线爆发, 特别是能量高于 20 keV 的电子通过韧致辐射产生的硬 X 射线, 被认为占据了 50% 的耀斑能量^[8]. 尽管电子和离子可以通过多种方式在耗散区得到加速, 然而到目前为止, 人们对磁重联过程中, 磁能具体如何转变为粒子能量尚不完全明确.

在实验室中, 普林斯顿大学的 Yamada 等^[9]对磁驱动磁重联过程中磁能的转化进行了实验研究. 研究表明: 在等离子体磁重联过程中, 磁能耗散的区域比传统理论区域大. 在耗散区, 离子和电子被加热和加速, 50% 的磁能转化成为粒子的能量, 其中 2/3 的能量转化为离子的能量; 1/3 的能量转化为电子的能量. 此外, 利用强激光也可以在实验室构建更大物理参数空间的磁重联过程^[10–13]. 强激光与物质相互作用产生等离子体过程中, 等离子体在沿着和垂直靶面方向存在明显的温度和密度梯度, 这种梯度方向的不一致性会通过毕尔曼电池效应产生等离子体自生磁场^[14–16]. 质子成像实验已经证实^[17–19], 纳秒脉冲强激光产生的等离子体自生磁场强度高达 10^6 Gs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$), 磁场冻结在等离子体表面并与等离子体一起高速运动, 呈环形结构, 在 2–3 ns 时间尺度保持稳定. 利用双路激光同向打靶^[2], 在靶面形成两团等离子体. 将两团等离子体水平分开适当距离, 让产生自生磁场的两团等离子体在靶面高速相遇, 通过分析环形磁场位型, 发现二者之间的磁场方向正好反向, 从而构建激光驱动磁重联过程.

本文利用上海高功率激光实验室神光 II 激光器和日本大阪大学 Gekko 激光器进行激光驱动磁

重联实验. 在实验中, 首次从不同角度对垂直于磁重联平面的喷流进行观察诊断, 并对垂直于重联平面产生的高能电子进行了测量和分析, 同时采集到了等离子体重联区域 X 射线辐射图像和密度分布图像. 这对理解磁重联过程中磁能的转化和磁重联理论模型的建立都有重要的意义.

2 实验布置

实验在高功率激光物理国家实验室“神光 II”激光装置上进行. 如图 1 所示, 神光 II 四路激光 (波长为 $1.053 \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 1 ns, 总能量为 400 J) 每两路分别聚焦在厚度为 $100 \mu\text{m}$ 铝片的两点上, 激光焦斑直径为 $150 \mu\text{m}$ 左右, 激光焦斑中心间距为 $400 \mu\text{m}$. 两台针孔相机位于铝片的正面和侧面, 针孔直径为 $10 \mu\text{m}$, 镀膜滤片的厚度为 $50 \mu\text{m}$, 分别用来监视激光等离子体正面和侧面的 X 射线辐射. 第九路皮秒 (波长为 $0.527 \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 120 ps, 总能量为 50 mJ) 激光作为探针光通过等离子体区域, 然后由分束镜将其分为两个通道, 分别用来得到等离子体的阴影成像和干涉成像. 通过改变探针光与主激光的时间差, 在实验中可以获得不同时刻的阴影成像和干涉成像, 其中阴影成像反映的是等离子体折射率二阶导数的信息, 干涉图像反映的是等离子体密度分布信息. 在铝片的前方安装了测量电子能谱的磁谱仪, 测量范围为 0–1.2 MeV.

在日本大阪大学的 Gekko 激光器上也进行了类似的实验. Gekko 激光器波长为 $1.05 \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 500 ps, 单路能量大约 400 J. 类似于图 1 所

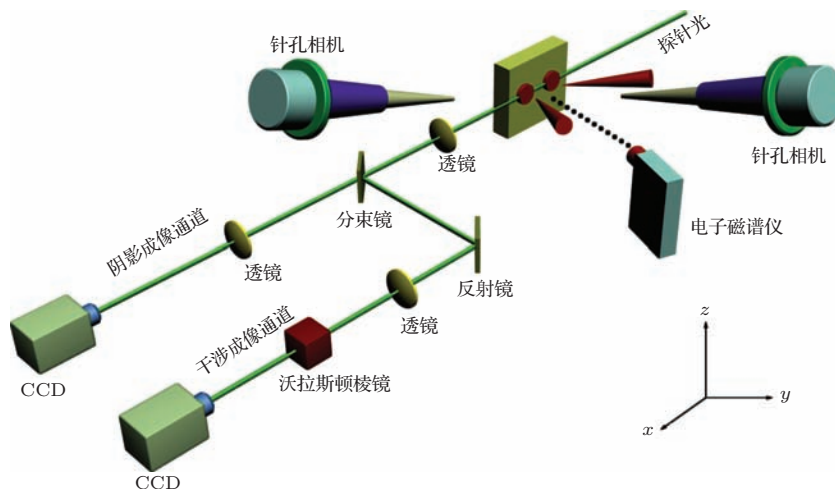


图 1 (网刊彩色) 实验布置图

Fig. 1. (color online) Experimental setup.

示, 两路激光同时聚焦于Cu片的表面, 激光焦斑直径大约为50—100 μm , 两激光焦斑中心间距为400 μm , 激光强度约为 $10^{16} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$; 在Cu片的正面, 透过靶室铍窗(铍窗厚度为100 μm), 安装有一台电磁谱仪, 测量范围是0—1.2 MeV, 用于测量并记录来自等离子体的电子能谱.

3 实验结果与讨论

3.1 磁重联喷流的特征及时间演化

图2(a1)和(b1)是两种激光与靶物质相互作用的位形, (a1)激光聚焦铝靶两侧上下两点; (b1)激光聚焦铝靶两侧左右两点, 这样可以从不同的角度观察等离子体喷流的形态. 图2(a2)显示1 ns

时刻喷流演化状态. 经过计算得出喷流速度约400 km/s, 同时可以看到喷流存在一定结构^[20], 这表明实验观测的喷流存在更加细致的结构, 应该提高实验诊断的分辨率, 从而进一步探测磁重联喷流的结构. 图2(a3)显示时间积分的X射线图像, 从图中激光焦斑的均匀度可以判断每束激光的能量均衡. 由于激光能量的传输, 在焦斑附近产生强的X射线辐射, 同时等离子体流开始向四周扩散, 在两个焦斑之间同样看到了强的X射线辐射, 等离子体流发生了碰撞. 图2(b2)—(b4)为等离子体喷流的时间演化图. 喷流在传输过程中, 可以明显的看到等离子体的流动途径. 初始时刻在靶面形成了等离子团, 1.5 ns时刻, 等离子体团变小, 同时在垂直靶面看到了小的喷流. 2.5 ns时刻等离子体团进一步变小, 而喷流开始迅速膨胀, 最终高速喷射出去.

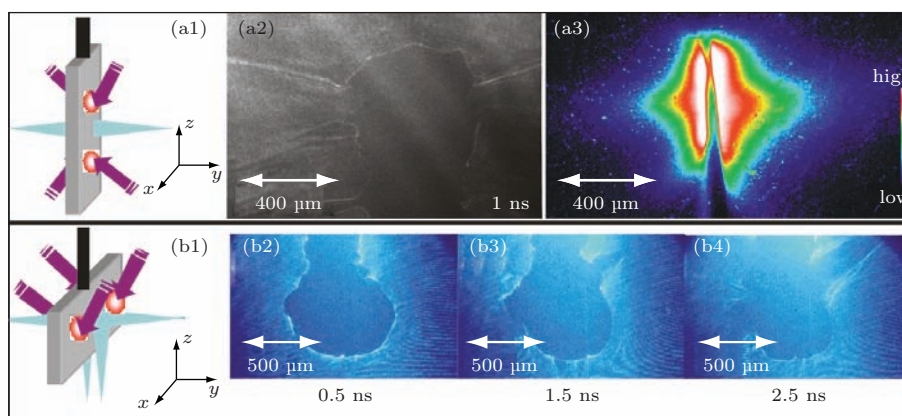


图2 (a1), (b1) 激光与靶相互作用示意图; (a2) 等离子体阴影成像; (a3) 等离子体 X 射线针孔相机成像; (b2)—(b4) 0.5—2.5 ns 等离子体喷流时间演化

Fig. 2. (a1), (b1) Schematic of the target irradiated by laser beams; (a2) shadowgraphy image of plasma jets; (a3) X-ray image of plasma jets; (b2)—(b4) shadowgraphy images show the temporal evolution of plasma jets from 0.5 to 2.5 ns.

两种打靶方式的结果对比可以看出: 从两个正交的角度观察等离子体相互作用, 证实在垂直于重联平面方向存在高速喷流. 这个喷流并不是由于碰撞导致的, 因为如果是假设碰撞受力是均匀的, 那么应该是一个扇形结构, 而不是准直的喷流结构, 这可以说明垂直于重联平面方向的高速喷流是与磁重联密切相关的. 经典二维磁重联模型产生的喷流是在磁重联平面内, 方向相反的一对喷流. 然而, 实验中的喷流与经典二维磁重联模型预言的喷流方向不一致, 产生的原因可能与激光驱动磁重联产生的重联电场有关, 另外也可能是三维激光驱动磁重联必然的结果. 在演化图中我们看到了明显的球状等离子体团, 显示了三维结构.

3.2 磁重联喷流的结构

为了进一步研究垂直靶面喷流的结构特征, 进行了单侧打靶的实验. 如图3所示, 激光聚焦在铝片的上下两点, 两点中心间距为400 μm . 图3(a)为激光与铝片作用1.5 ns之后的干涉成像, 图中的两个亮斑为激光聚焦位置. 在靶平面的法线方向产生了一个非常明显的高速喷流, 并且在图中可以看到清晰的电子轨迹. 在激光等离子体磁重联过程中, 等离子体由于毕尔曼电池效应会产生环形磁场, 两团等离子体中间的区域磁感线会断开并重新连接, 在这个过程中重联区的磁场变化非常的剧烈, 根据Maxwell方程可以知道, 重联区会产生一

个法线方向的电场,如图3(a)所示.在这个重联电场的作用下,重联区的电子被加热和加速.图3(b)为等离子体电子密度分布图^[21].在图中可以清晰地看到等离子体喷流的结构,喷流中部的等离子体密度较高, $n_e = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,喷流边缘的等离子体密度较低, $n_e = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,激光等离子体的自生磁场约为 10^6 G s量级,等离子体

$$\beta = \frac{p_e}{B^2/2\mu_0} = \frac{n_e k_B T_e}{B^2/2\mu_0} = 0.4,$$

其中电子密度 $n_e = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$;玻尔兹曼常数 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;电子温度 $T_e = 1000 \text{ eV} = 1.16 \times 10^7 \text{ K}$;磁场 $B = 100 \text{ T}$,这说明磁耗散占主导,磁能得到快速释放.图3(c)为等离子体X射线针孔成像图.从图中可以看出,被重联电场加速出来的电子具有很强的X射线辐射,并且呈现出中间强两边弱的对称结构,这说明重联区的电子被有效地加热和加速.

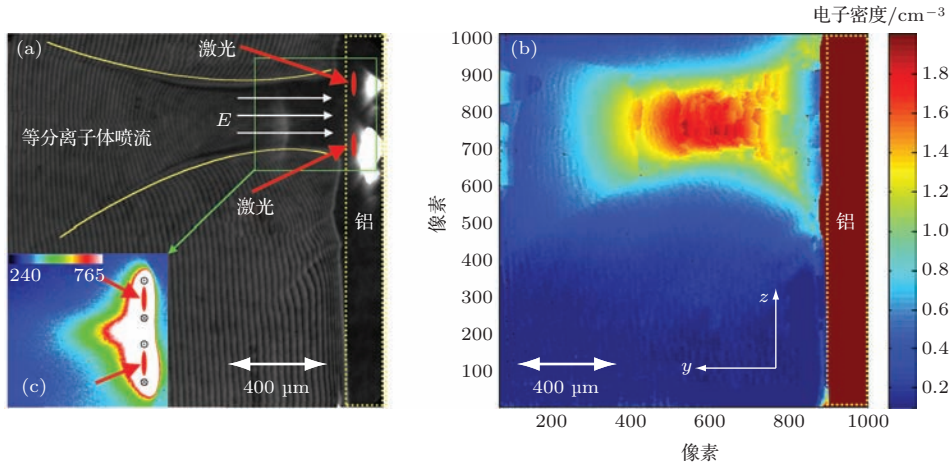


图3 (a)重联平面法线方向的等离子体干涉成像图,延时1.5 ns;(b)重联平面法线方向的等离子体电子密度分布图;(c)重联平面法线方向的等离子体X射线针孔成像图

Fig. 3. (a) Interferometry optical image of the plasma jet observed at 1.5 ns in the direction perpendicular to the reconnection plane; (b) distribution of the electron density derived with Abel inverting techniques; (c) X-ray image of plasma jet, red arrows shows the laser focus spots.

3.3 磁重联加速电子的能谱特征

为了测量电子能谱,我们利用大阪大学Gekko激光器也进行了激光驱动磁重联实验.在实验中分别采用激光聚焦一点(无磁重联)和聚焦于相距 $400 \mu\text{m}$ 两点(有磁重联)的模式,目的是为了观察对比,验证磁重联对电子有加速效应.在垂直于靶面的方向上,我们在靶室的外面安装了一个量程为 $0\text{--}1.2 \text{ MeV}$ 电子磁谱仪.虽然电磁谱仪的距离很远,并且在靶室壁上还需要经过一个 $100 \mu\text{m}$ 的铍窗,但是我们依然观测到了来自等离子体重联区域的高能电子.从能谱结果(图4)可以看出,电子能谱的信号不是很强,且信号中伴随着噪声.在有磁重联发生的情况下,电子能谱呈现出比较平坦的谱型,在 1.2 MeV 的位置有截断的趋势;在没有磁重联发生的情况下,电子能谱信号非常弱,对比之下可以看出,加速电子的能量可能主要来源于等离子体磁重联过程.

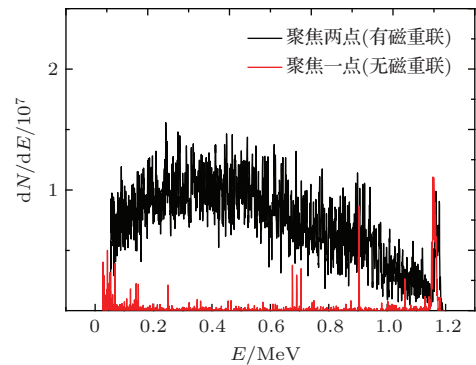


图4 重联平面法线方向的电子磁谱仪结果(Cu片)

Fig. 4. Electron energy spectra measured by magnetic spectrometry in the direction of plasma jet. The black lines show the case in the reconnection and the red line shows the case without magnetic reconnection.

图5为在神光磁重联实验中铝、钼和金靶在靶法线方向的电子能谱,采用两个焦点打靶,距离 $400 \mu\text{m}$.图中紫线是对麦克斯韦谱的拟合.铝的电子能谱分为三段,能量在 $0.02\text{--}0.1 \text{ MeV}$ 的能谱呈现麦克斯韦分布,超热电子温度约为

42.3 keV; 在 0.1—0.5 MeV 电子能谱有一个明显的衰减, 说明被加速到高能电子数明显减少; 在 0.5—1.2 MeV 的电子能谱趋于平缓, 噪声干扰变大, 说明重联加速的电子已经非常少, 信号更加趋向于背景. 钽的电子能谱在电子低能区域呈现单温结构, 在 0.05—0.3 MeV 是明显的麦克斯韦谱, 其超热电子温度约为 203.5 keV. 金的电子能谱在 0—0.2 MeV 能段呈现麦克斯韦谱, 超热电子温度约为 178.8 keV. 在钽和金的高能电子端都观察到了明显强于背景的信号, 这有可能是重联加速的电子信号 [22,23]. 从图 5 也可以看出, 随着原子序数的增加, 在磁重联过程中被加速的电子也增多. 由于高 Z 元素形成等离子体的电子密度比较大, 对比三种不同元素靶的高能端电子密度不难看出: 高 Z 元素的信噪比要好很多, 高能端电子能谱也较为平滑. 钽和金的谱指数比铝的谱指数硬, 这说明高 Z 靶的电子温度要比低 Z 靶的高很多.

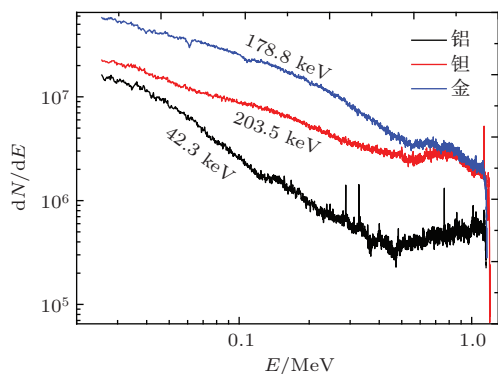


图 5 铝、钽和金靶在靶法线方向的电子能谱

Fig. 5. Electron energy spectra recorded for different target materials, Al(black line), Ta (red line) and Au (blue line).

4 结 论

本文利用上海神光 II 激光器和日本大阪大学的 Gekko 激光器进行了激光驱动磁重联实验, 在重联过程中发现垂直于重联平面的喷流, 从不同观测角度验证了法向高速喷流存在, 获得了法向喷流的位形、密度分布和电子能谱等信息. 提出喷流和该方向的电子能谱可能与重联电场相关, 这对理解等离子体磁重联过程中能量的转化和磁重联理论模型的建立都有重要的意义.

参考文献

[1] Yamada M, Kulsrud R, Ji H T 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 603

[2] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G, Wang J Q, Dong Q L, Xiao C J, Wang S J, Liu X, Zhang L, An L, Wang F L, Zhu J Q, Gu Y, He X T, Zhao G, Zhang J 2010 *Nat. Phys.* **6** 984

[3] Yamada M 2007 *Phys. Plasmas* **14** 058102

[4] Parker E N 1957 *J. Geophys. Res.* **62** 509

[5] Sitnov M I, Sharma A S, Papadopoulos K, Vassiliadis D 2001 *Phys. Rev. E* **65** 016116

[6] Nishizuka N, Hayashi Y, Tanabe H, Kuwahata A, Kaminou Y, Ono Y, Inomoto M, Shimizu T 2012 *Astrophys. J.* **756** 152

[7] Jing J, Yurchyshyn Vasyl B, Yang G, Xu Y, Wang H M 2004 *Astrophys. J.* **614** 1054

[8] Lin R P, Krucker S, Hurford G J, Smith D M, Hudson H S, Holman G D, Schwartz R A, Dennis B R, Share G H, Murphy R J, Emslie A G, Johns-Krull C, Vilmer N 2003 *Astrophys. J.* **595** L69

[9] Yamada M, Yoo J, Jara-Almonte J, Ji H T, Kulsrud R M, Myers C E 2014 *Nat. Comm.* **5** 4774

[10] Xia J F, Zhang J 2001 *Physics* **30** 210 (in Chinese) [夏江帆, 张杰 2001 物理 **30** 210]

[11] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J 1984 *Rev. Mod. Phys.* **56** 255

[12] Remington B A, Drake R P, Ryutov D D 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 755

[13] Xia J F, Zhang J 2001 *Physics* **30** 545 (in Chinese) [夏江帆, 张杰 2001 物理 **30** 545]

[14] Haines M G 1986 *Can. J. Phys.* **64** 912

[15] Stamper J A, Papadopoulos K, Sudan R N, Dean S O, McLean E A, Dawson M J 1971 *Phys. Rev. Lett.* **26** 1012

[16] Haines M G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 254

[17] Li C K, Se'guin F H, Frenje J A, Rygg J R, Petrasso R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 135003

[18] Nilson P M, Willingale L, Kaluza M C, Kamperidis C, Minardi S, Wei M S, Fernandes P, Notley M, Bandyopadhyay S, Sherlock M, Kingham R J, Tatarakis M, Najmudin Z, Rozmus W, Evans R G, Haines M G, Dargor A E, Krushelnick K 2008 *Phys. Plasmas* **15** 092701

[19] Nilson P M, Willingale L, Kaluza M C, Kamperidis C, Minardi S, Wei M S, Fernandes P, Notley M, Bandyopadhyay S, Sherlock M, Kingham R J, Tatarakis M, Najmudin Z, Rozmus W, Evans R G, Haines M G, Dargor A E, Krushelnick K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 255001

[20] Pei X X, Zhong J Y, Zhang K, Zheng W D, Liang G Y, Wang F L, Li Y T, Zhao G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 145201 (in Chinese) [裴晓星, 仲佳勇, 张凯, 郑无敌, 梁贵云, 王菲鹿, 李玉同, 赵刚 2014 物理学报 **63** 145201]

[21] Hipp M, Woisetschlager J, Reiterer P, Neger T 2004 *Measurement* **36** 53

[22] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Zhou W M, Jiao C Y, Wen T S, Chunyu S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 346 (in Chinese) [蔡达峰, 谷渝秋, 郑志坚, 周维民, 焦春晔, 温天舒, 淳于书泰 2007 物理学报 **56** 346]

[23] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Yang X D, Wen T S, Chunyu S T 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 575 (in Chinese) [蔡达峰, 谷渝秋, 郑志坚, 杨向东, 温天舒, 淳于书泰 2003 强激光与粒子束 **15** 575]

Measurement of jet evolution and electron energy spectrum during the process of laser-driven magnetic reconnection*

Zhang Kai¹⁾²⁾ Zhong Jia-Yong^{3)†} Pei Xiao-Xing¹⁾²⁾ Li Yu-Tong⁴⁾ Sakawa Youichi⁵⁾
 Wei Hui-Gang¹⁾ Yuan Da-Wei¹⁾ Li Fang⁴⁾ Han Bo¹⁾ Wang Chen⁶⁾ He Hao⁶⁾
 Yin Chuan-Lei⁴⁾ Liao Guo-Qian⁴⁾ Fang Yuan⁷⁾ Yang Su⁷⁾ Yuan Xiao-Hui⁷⁾
 Liang Gui-Yun¹⁾ Wang Fei-Lu¹⁾ Zhu Jian-Qiang⁸⁾ Ding Yong-Kun⁹⁾
 Zhang Jie⁷⁾ Zhao Gang¹⁾

1) (Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

4) (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

5) (Institute of Laser Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan)

6) (Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

7) (Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

8) (National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai 201800, China)

9) (Research Center for Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 30 January 2015; revised manuscript received 14 March 2015)

Abstract

Magnetic reconnection (MR) is a universal physical process in plasma, in which the stored magnetic energy is converted into high-velocity flows and energetic particles. It is believed that MR plays an important role in many plasma phenomena such as solar flare, gamma-ray burst, fusion plasma instabilities, etc.. The process of MR has been studied in detail by dedicated magnetic-driven experiments. Here, we report the measurements of magnetic reconnection driven by Shenguang II lasers and Gekko XVII lasers. A collimated plasma jet is observed along the direction perpendicular to the reconnection plane with the optical probing. The present jet is very different from traditional magnetic reconnection outflows as known in the two-dimensional reconnection plane. In our experiment, by changing the delay of optical probing beam, we measure the temporal evolution of jet from 0.5 ns to 2.5 ns and its velocity around 400 km/s is deduced. High-collimated jet is also confirmed by its strong X-ray radiation recorded by an X-ray pinhole camera. With the help of optical interferograms we calculate the jet configuration and its density distribution by using Abel inverting technique. A magnetic spectrometer with an energy range from hundred eV up to one MeV is installed in front of the jet, in the direction perpendicular to the reconnection plane, to measure the accelerated electrons. Two cases are considered for checking the acceleration of electrons. The results show that more accelerated electrons can be found in the reconnection

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CBA01503), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11205015, 11273033, 11135012), and the Beijing Nova Program, China (Grant No. Z131109000413050).

† Corresponding author. E-mail: jyzhong@bnu.edu.cn

case than in the case without reconnection. We propose that the formation and collimation of the plasma jet, and the electron energy spectrum may be possible directly influenced by the reconnection electric field, which is very important for understanding the energy conversion in the process of MR and establishment of the theoretical model. Finally the electron energy spectra of three different materials Al, Ta and Au are also shown in our work. The results indicate that the higher atomic number material can obtain a better signal-noise ratio, which provides some helpful references for our future work.

Keywords: magnetic reconnection, electron acceleration

PACS: 52.38.Fz, 52.35.Vd

DOI: [10.7498/aps.64.165201](https://doi.org/10.7498/aps.64.165201)