

强激光产生的强磁场及其对弓激波的影响

李彦霏 李玉同 朱保君 袁大伟 李芳 张喆 仲佳勇 魏会冈 裴晓星 刘畅 原晓霞 赵家瑞 韩波
廖国前 鲁欣 华能 朱宝强 朱健强 方智恒 安红海 黄秀光 赵刚 张杰

Strong magnetic fields generated with a metal wire irradiated by high power laser pulses and its effect on bow shock

Li Yan-Fei Li Yu-Tong Zhu Bao-Jun Yuan Da-Wei Li Fang Zhang Zhe Zhong Jia-Yong Wei Hui-Gang Pei Xiao-Xing Liu Chang Yuan Xiao-Xia Zhao Jia-Rui Han Bo Liao Guo-Qian Lu Xin Hua Neng Zhu Bao-Qiang Zhu Jian-Qiang Fang Zhi-Heng An Hong-Hai Huang Xiu-Guang Zhao Gang Zhang Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 095202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.095202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.095202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低密度泡沫金提升黑腔腔壁再发射率的实验研究

[Experimental study on improving hohlraum wall reemission ratio by low density gold foam](#)

物理学报.2016, 65(1): 015202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.015202>

激光诱导等离子体对水 OH 伸缩振动受激拉曼散射的影响

[Influence of laser-induced plasma on stimulated Raman scattering of OH stretching vibrational from water molecules](#)

物理学报.2014, 63(20): 205204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.205204>

激光诱导击穿空气等离子体时间分辨特性的光谱研究

[Spectroscopic study on the time evolution behaviors of the laser-induced breakdown air plasma](#)

物理学报.2014, 63(20): 205205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.205205>

基于激光诱导击穿光谱技术定量分析食用明胶中的铬元素

[Quantitative analysis of chromium in edible gelatin by using laser-induced breakdown spectroscopy](#)

物理学报.2014, 63(14): 145202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.145202>

纳秒激光烧蚀冲量耦合数值模拟

[Numerical simulation of nanosecond laser ablation impulse coupling](#)

物理学报.2013, 62(19): 195203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.195203>

强激光产生的强磁场及其对弓激波的影响*

李彦霏¹⁾⁸⁾ 李玉同^{1)7)8)†} 朱保君¹⁾⁸⁾ 袁大伟²⁾ 李芳¹⁾ 张喆¹⁾
 仲佳勇³⁾⁷⁾ 魏会冈²⁾ 裴晓星²⁾ 刘畅³⁾ 原晓霞³⁾ 赵家瑞¹⁾
 韩波²⁾³⁾ 廖国前¹⁾ 鲁欣¹⁾⁸⁾ 华能⁴⁾ 朱宝强⁴⁾ 朱健强⁴⁾⁷⁾
 方智恒⁵⁾ 安红海⁵⁾ 黄秀光⁵⁾⁷⁾ 赵刚²⁾⁷⁾ 张杰⁶⁾⁷⁾

1)(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2)(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

3)(北京师范大学天文系, 北京 100875)

4)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 大功率激光与物理国家实验室, 上海 201800)

5)(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

6)(上海交通大学, 激光等离子体实验室(教育部), 物理与天文系, 上海 200240)

7)(上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

8)(中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

(2016年12月21日收到; 2017年1月23日收到修改稿)

强激光照射金属线圈后, 会在打靶点附近的背景等离子体中诱发冷电子的回流, 在金属丝内形成强电流源, 从而产生强磁场. 本文利用神光II高功率激光器产生的强激光照射金属丝靶, 产生了围绕金属丝的环形强磁场. 利用B-dot对局域磁感应强度进行了测量, 根据测量结果, 结合三维模拟程序, 反演得到磁场的空间分布. 再利用强激光与CH平面靶相互作用产生的超音速等离子体撞击该金属丝, 产生了弓激波. 通过光学成像手段研究了磁场对冲击波的影响, 发现磁场使得弓激波的轮廓变得不明显并且张角变大. 同时, 通过实验室天体物理定标率, 将金属丝表面等离子参数变换到相应的天体参数中, 结果证明利用该实验方法可以在实验室中产生类似太阳风的磁化等离子体.

关键词: 强激光, 强磁场产生, 弓激波, 磁化等离子体

PACS: 52.50.Jm, 52.70.Ds, 52.25.Xz, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.66.095202

1 引言

宇宙中普遍存在着磁场, 许多天体物理过程中磁场都起着至关重要的作用^[1-5]. 例如, 当太阳风撞击地球时, 地磁场阻碍了太阳风, 使得地球表面免受太阳风的侵扰^[6]; 在喷流的形成、加速、准直过程中, 磁场扮演了主要的角色^[7,8]; 在太阳附近发生磁重联过程时, 正是磁场拓扑结构的变化引发

能量在磁场和带电粒子动能间的转化^[2,9,10]. 实验天体物理是基于实验手段来研究天体物理过程和机制的学科, 通过实验室天体物理定标率^[11], 将天体中的相关参数变化到实验室条件下, 利用实验过程再现天体过程, 从而可以对天体物理过程进行全面、深入的研究^[8-10,12-16]. 要进行与磁场相关的天体物理过程和机制的实验室研究, 就必须在实验内创造类似的磁场环境. 尽管许多天体环境中的磁感应强度低, 然而经过定标率变换后, 往往要求实

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CBA01501)、国家自然科学基金(批准号: 11135012, 11375262, 11520101003, 11503041)和科学挑战计划(批准号: TZ2016005)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ytli@iphy.ac.cn

实验室中的磁感应强度达到特斯拉量级甚至更高. 人们可以利用通电线圈来产生这样的磁场环境, 并取得了一定的研究成果 [8,16]. 最近, 有学者利用强激光辐照电容线圈靶产生了强磁场, 并积极探索将该磁场应用到实验室天体物理的研究中 [17-19]. 还有一些研究者利用激光照射平面靶后在等离子体内部会形成很强的自生磁场的原理, 设计类似天体中的磁化等离子体实验 [9,10,20-25]. 这种方法产生的磁感应强度可达百特斯拉, 磁场随着离子的膨胀而运动, 可以有效模拟磁重联等过程. 然而, 该自生磁场存在于靶表面附近, 并且磁场方向与靶面平行, 这对实验设计和探测手段提出了较高的要求.

2015年, 我们的实验证明了当强激光照射到金属丝线圈靶的一端时, 由于超热电子逃离靶面, 靶面电势会急剧增高, 从而吸引背景等离子体中的冷电子向靶内回流, 流动的电子在线圈中形成强电流, 进而诱发了磁感应强度高达百特斯拉的强磁场 [26]. 本文在该实验基础上, 通过对金属丝形状的设计, 在强激光照射后, 获得了围绕金属丝的环形强磁场. 又利用强激光与CH平面靶相互作用驱动的高速等离子体撞击该金属丝的方法, 产生了弓激波, 观测了该磁场对弓激波的影响. 同时, 通过实验室天体物理定标率的变换发现, 被CH靶发射的强X射线离化的金属丝等离子体, 可以用来模拟太阳风.

2 实验

本实验是在神光II高功率激光装置上运行的. 实验布局如图1(a)所示, 神光II共8路主激光, 对称分布. 我们将8路主激光分为两束, 南、北4路各为一束. 每束波长351 nm, 脉宽1 ns, 总能量 240×4 J. 第9路激光作为光学诊断的探针光, 自西向东水平穿过靶室中心, 其波长527 nm, 脉宽30 ps. 实验采用两路同步的光学诊断, 一路为阴影成像, 另一路为干涉成像, 放大倍数均为4.2倍. 通过调节主激光和探针光的时间延迟, 可以得到不同时刻的等离子体演化图像. 我们以靶室中心为坐标原点, 上下方向为 x 轴, 东西方向为 y 轴, 南北方向为 z 轴, 建立了如图1(b)所示的直角坐标系. 磁感应强度则由B-dot测量. B-dot是由两个直径1.05 mm、反向平行放置的感应线圈组成的. 这两个感应线圈对磁场的感应信号数值正负相反, 而对噪声的感应信号数值正负相同, 所以通过将两个线圈信号数值做差的方法, 可以有效降低噪声对测量精度的影响. B-dot线圈中心的位置坐标为 $(-7.2, 0, -19.3)$, 单位mm; 线圈平面竖直放置, 用来测量水平方向磁感应强度 (B_y). 另外, 靶室外放置了一个掠入射角为 3° 的光谱仪来测量CH靶靶后位置处的软X射线光谱, 从而推算出从CH靶膨胀出的等离子体的温度.

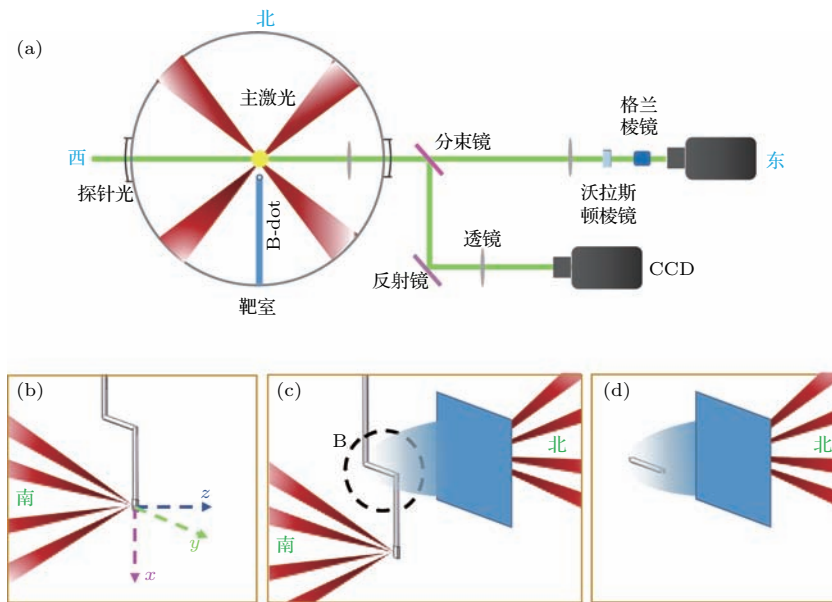


图1 实验布局图

Fig. 1. Experimental set-up.

图 1(b)—(d) 展示了实验所采用的三种靶型. 其中金属丝材料为 Al, 直径 200 μm , 上端竖直部分连接在靶室壁上达到接地效果; 中间水平部分长 3.5 mm, 该部分产生的强磁场将作用于等离子体, 研究磁场与等离子体的作用; 下端竖直部分长度达 3 mm 以上, 以确保该打靶点处于光学成像的视场之外, 避免其对光学诊断的成像效果的影响; 金属丝最下端端点处被压制成平面靶, 该平面靶中心位于靶室中心, 即坐标原点, 作为南 4 路激光的打靶点. 图 1(b) 中南 4 路激光聚焦照射在金属丝下端平面靶上, 激光焦斑直径约 150 μm , 平均光强约 $5.4 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, 诱导金属丝中产生强电流, 从而生成强磁场. 图 1(c) 中右侧的平面靶, 材料 CH, 尺寸 $2 \times 2 \times 0.005 \text{ mm}$, 与金属丝的距离为 1 mm, 靶面与金属丝所在平面平行. 北 4 路激光汇聚在 CH 平面靶上, 光斑直径约 600 μm , 靶面的平均光强约 $3.4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 在 CH 平面靶的表面产生了向靶后运动的高速、低密度等离子体, 该等离子体与前方金属丝产生的强磁场相互作用. 金属丝水平部分、CH 平面靶及北 4 路激光光斑尺寸的选取, 保证了金属丝仅水平部分与从 CH 平面靶到来的高速等离子体相互作用, 竖直部分无法与该等离子体接触. 作为图 1(c) 的实验对照, 图 1(d) 中的金属丝仅保留水平部分, 并且仅北 4 路激光照射 CH 平面靶产生高速等离子体, 撞击前方的水平金属丝.

3 实验结果与讨论

图 2 为磁场测量结果, 其中红色和绿色曲线代表 B-dot 中两个感应线圈的测量值, 黑色曲线为两个线圈测量值做差后的结果. 纵坐标为磁感应强度, 横坐标为测量时刻. 从图 2 可以看出磁场强度的时间演化: 大约 49 ns 时, 激光照射到细丝下端的平面靶上, 细丝中开始出现电流, 磁场开始出现, 约在 1 ns 之后磁感应强度达到峰值约 0.017 T, 又经过 1 ns 后磁感应强度衰减下来. 我们之前的实验结果已经证明了磁场的产生机制: 当激光照射到金属丝下端的平面靶后, 靶内产生的超热电子逃逸出来, 使得靶面位置电势迅速升高, 该高电势会吸引靶面附近背景等离子体中的电子, 该电子汇聚后流入金属丝, 形成强电流, 强电流诱导产生了强磁场.

我们利用三维程序 Radia 模拟了金属丝内不同电流强度下磁场的空间分布. 将 B-dot 所在位置处的磁场峰值探测结果代入程序中, 则可以反推出此时金属丝中电流强度为 5.5 kA, 相应地可以得到

磁场的空间分布. 当 $z = 0$ 时 x - y 平面内的磁感应强度分布如图 3(a) 所示. 图 3(b) 为金属丝水平部分中点处沿着 z 轴负方向的磁场分布曲线, 可以看出金属丝周围磁场将近 10 T, 在金属丝 1 mm 处磁感应强度约 1 T.

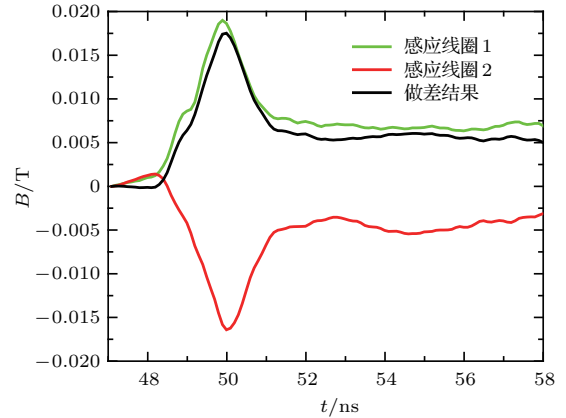


图 2 (网刊彩色) B-dot 所在位置的磁感应强度测量结果
Fig. 2. (color online) The local magnetic induction intensity measured by B-dot.

图 4 展示了探针光相对与主激光脉冲后沿延迟 3 ns 时刻的光学成像结果. 由于探针光自西向东水平传播, 所以光学成像为侧向投影. 因此, 图中仅能看到 CH 平面靶的侧面, 图中用白色粗线表示该侧面的轮廓; 金属丝各部分的侧面投影重合到一起, 水平部分的投影为横截面的圆形, 在图中用蓝色圆形表示横截面的位置和大小; 图中的红色箭头代表北 4 路主激光. 光学成像图中深黑色区域是由于该处等离子体密度或者梯度过高, 探针光被吸收或者偏折掉了所致. 从图 4 可以看到: 金属丝的水平部分被激光与 CH 平面靶作用产生的 X 射线所离子化, 直径膨胀约为 500 μm ; 而由于位置关系, 竖直部分膨胀较小. 图 4 中蓝色圆形上面较宽的高密度区域部分是放置在金属丝两端用来支撑金属丝的支撑架的投影. 该支撑架远离等离子体和金属丝作用区域, 所以对实验不会造成影响.

图 4(a) 和图 4(b) 中, 采用图 1(d) 中的靶型, 利用 CH 靶后产生的高速等离子体撞击不带磁场的金属丝; 图 4(c) 中采用图 1(c) 中的靶型, 利用等离子体撞击带有磁场的金属丝. 从图 4 的光学成像结果中可以明显看到在金属丝前面产生了弓激波. 对比图 4(b) 和图 4(c) 的成像结果, 可以发现: 在无磁场时, 激光照射 CH 平面靶产生的高速等离子体撞击金属丝后, 形成了明显的弓激波; 有磁场时, 阴影成像中的弓激波的轮廓不明显, 并且张角变大.

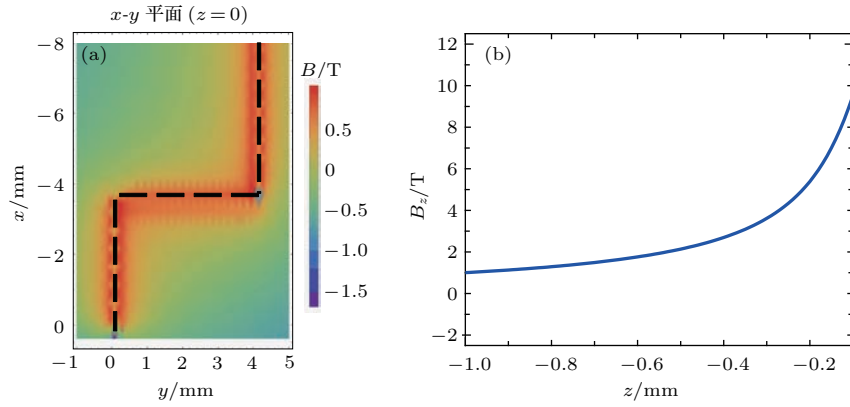


图3 (网刊彩色) (a) $z = 0$ 处 $x-y$ 平面内的磁场分布的模拟结果; (b) 金属丝水平部分中点处沿 z 轴磁感应强度 B_z 的分布曲线

Fig. 3. (color online) (a) The simulated two-dimensional magnetic field distribution in the $x-y$ plane with $z = 0$, the dashed line is the outline of the target wire; (b) the magnetic induction intensity profile of B_z along x axis from the center of the horizontal wire.

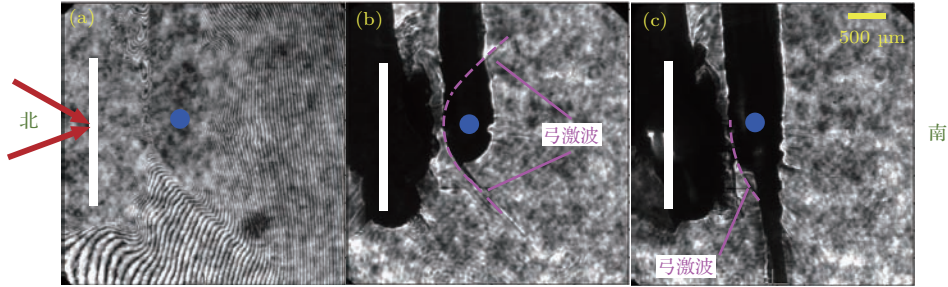


图4 (网刊彩色) 3 ns 延迟时刻的光学成像结果 (a), (b) 分别对应图 1(d) 靶型的无磁场情况下的干涉图和阴影图; (c) 对应图 1(c) 靶型的有磁场情况的阴影图

Fig. 4. (color online) Optical imaging results at 3 ns delay time: Panels (a) and (b) are the interferogram and shadowgraph corresponding to the target in Fig. 1(d); panel (c) is the shadowgraph corresponding to the target in Fig. 1(c).

为了弄清楚CH平面靶后膨胀的等离子体的行为, 实验中我们首先拍摄了无金属丝的情况, 并据此估算出 3 ns 时到达金属丝附近的CH等离子体流速约为 300 km/s. 又根据探测到的软X射线光谱中 C_{VI} (带六个正电荷的碳离子) 和 C_V (带五个正电荷的碳离子) 的强度比, 计算出其温度为 95 eV (温度单位 eV 对应 kT , k 为玻尔兹曼系数, T 为温度值, 单位为开尔文(K); 等离子体物理中常用 eV 表示温度, 1 eV 的温度对应 11600 K). 利用图 4(a) 干涉图中的条纹移动, 经 Abel 反演, 可以得到CH靶后透光区域条纹移动地方的等离子体的电子数密度 (即激波上游电子数密度) $n_1 \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 据此推测, 紧邻透光区域的黑色无条纹处的等离子体密度 (即激波下游电子数密度) 约为 $n_2 \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 由于实验中弓激波位置稳定, 所以可以将激波坐标系近似为实验室坐标系. 在实验室坐标系中, 弓激波上游等离子体压强

$P_1 = \rho_1 v_1^2 + n_1 k T_1 \approx \rho_1 v_1^2 \approx 5.4 \times 10^9 \text{ Pa}$, 其中 ρ, v, n, T 分别为等离子体的质量密度、流速、电子数密度、温度; k 为玻尔兹曼常数, 下标 1 表示上游参数, 下标 2 表示下游参数. 由压强平衡条件, 下游压强 $P_2 = P_1 \approx 5.4 \times 10^9 \text{ Pa}$. 由图 2 测量结果可知, 激光作用后, 磁场衰减很快, 在 3 ns 延迟时刻, 约为峰值强度的 1/4, 则金属丝附近的磁感应强度约为 2 T, 相应的磁压 $\frac{B^2}{8\pi} \approx 1.6 \times 10^5 \text{ Pa} \ll P_1$. 然而需要注意的是磁场会被运动的等离子体挤压, 从而造成磁压的增大. 尤其在激光到来 1 ns 时刻, 磁感应强度最强, 被等离子体压缩后, 会对等离子产生较强的阻碍作用, 使得等离子体的马赫数降低. 又因为弓激波的张角与等离子体的马赫数负相关, 激波下游、上游的密度比 ρ_2/ρ_1 与马赫数正相关 [27], 所以对于有磁场的情况, 形成的弓激波张角会变大, 密度跳变不明显 (即光学成像图中弓激波轮廓

不清晰).

同时, 激波下游等离子体的压强 $P_2 \approx \rho_2 v_2^2 + n_2 k T_2$, 根据上述干涉结果 $n_2 \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 文献 [28] 中采用强度相似、脉宽 0.5 ns 的激光照射 CH 靶产生的 X 射线离化出的等离子体温度为 3.1—3.7 eV. 据此, 我们估计本实验中金属丝离化出的等离子体的温度为几个 eV, 因此, $n_2 k T_2 \approx 10^7 - 10^8 \text{ Pa} \ll P_2 \approx 5.4 \times 10^9 \text{ Pa}$; 得到 $P_2 \approx \rho_2 v_2^2$, 并通过该式可以计算出, $v_2 \sim 10^7 \text{ cm/s}$. 该实验结果与其他实验探测到的被 X 射线离化出的等离子体流速相符 [28]. 通过实验室天体物理定标率中的磁流体力学变换关系可知, 当两个系统的物理参量满足下列关系时, 这两个系统将发生类似的物理过程.

$$\begin{aligned} r &= ar_1; \quad \rho = b\rho_1; \quad p = cp_1; \\ v &= \sqrt{\frac{c}{b}}v_1; \quad B = \sqrt{c}B_1; \quad t = a\sqrt{\frac{b}{c}}t_1, \end{aligned}$$

其中 r, t 分别代表系统的空间、时间特征量; a, b, c 为比例系数. 根据上述实验测量值, 我们取 $a = 10^{-10}, b = 10^{18}, c = 10^{18}$, 则相应得到对应的天体参数如表 1 所列.

表 1 等离子体的实验室参数和经实验室天体物理定标率变换后的天体参数

Table 1. Parameters of plasma in laboratory and in the space connected by the similarity criteria.

	实验室参数	天体参数
r/cm	0.1	10^9
n/cm^{-3}	10^{19}	10
T/eV	1—10	1—10
B/T	1	10^{-9}
$v/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	10^7	10^7
t/s	10^{-9}	10

该实验参数对应的天体参数正好与地球附近的太阳风参数相当. 所以可以认为本实验中金属丝被离化产生的磁化等离子体可以有效模拟太阳风等离子体, 并且适合模拟时间范围在几十秒的过程.

4 结 论

本文在先前实验基础上, 通过对金属丝形状的设计, 获得了围绕金属丝的环形强磁场. 利用

$B\cdot\dot{}$ 对局域磁感应强度进行了测量, 根据测量结果, 结合三维模拟程序, 反演得到了磁场的空间分布. 并且进一步将该磁场应用到弓激波的研究中, 利用强激光与 CH 平面靶的相互作用产生的超音速等离子体撞击该金属丝形成了弓激波, 通过光学成像手段研究了磁场对弓激波波形的影响. 实验证明磁场的存在降低了 CH 靶后膨胀出的等离子体的马赫数, 导致了弓激波张角的变大和密度跳变的减小. 相对于其他方法, 本文中产生强磁场的方法对靶室内布局、激光打靶方式、探测手段的要求更低, 使得实验设计更加灵活, 所以该方法更便于利用. 同时, 强激光与 CH 平面靶的相互作用产生的强 X 射线将金属丝表面离化为等离子体, 通过实验室天体物理定标率的转换证明了该等离子体可以有效模拟太阳风的磁化等离子体. 未来可以通过新的实验设计, 对此磁化等离子加以利用, 以模拟与太阳风有关的特征时间在几十秒范围的天体物理过程.

感谢在上海神光 II 高功率激光实验装置相关部门工作的所有员工对本文实验所做的贡献.

参考文献

- [1] Zank G P 1999 *Space Sci. Rev.* **89** 413
- [2] Yamada M, Kulsrud R, Ji H 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 603
- [3] Russell C T, Luhmann J G, Strangeway R J 2006 *Planet. Space Sci.* **54** 1482
- [4] Zhang T L, Lu Q M, Baumjohann W, Russell C T, Fedorov A, Barabash S, Coates A J, Du A M, Cao J B, Nakamura R, Teh W L, Wang R S, Dou X K, Wang S, Glassmeier K H, Auster H U, Balikhin M 2012 *Science* **336** 567
- [5] Mitchell C B 1998 *Astrophys. J.* **493** 291
- [6] Rigby B J, Mainstone J S 1973 *Planet. Space Sci.* **21** 499
- [7] Pudritz R E, Hardcastle M J, Gabuzda D C 2012 *Space Sci. Rev.* **169** 27
- [8] Ciardi A, Vinci T, Fuchs J, Albertazzi B, Riconda C, Pépin H, Portugall O 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 025002
- [9] 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
- [10] Dong Q L, Wang S J, Lu Q M, Huang C, Yuan D W, Liu X, Lin X X, Li Y T, Wei H G, Zhong J Y, Shi J R, Jiang S E, Ding Y K, Jiang B B, Du K, He X T, Yu M Y, Liu C S, Wang S, Tang Y J, Zhu J Q, Zhao G, Sheng Z M, Zhang J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 215001

- [11] Ryutov D D, Remington B A, Robey H F, Drake R P 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1804
- [12] Liu X, Li Y T, Zhang Y, Zhong J Y, Zheng W D, Dong Q L, Chen M, Zhao G, Sakawa Y, Morita T, Kuramitsu Y, Kato T N, Chen L M, Lu X, Ma J L, Wang W M, Sheng Z M, Takabe H, Rhee Y J, Ding Y K, Jiang S E, Liu S Y, Zhu J Q, Zhang J 2011 *New J. Phys.* **13** 093001
- [13] Yuan D W, Wu J F, Li Y, Lu X, Zhong J, Yin C, Su L, Liao G, Wei H, Zhang K, Han B, Wang L, Jiang S, Du K, Ding Y, Zhu J, He X, Zhao G, Zhang J 2015 *Astrophys. J.* **815** 46
- [14] Dong Q L, Wang S J, Li Y T, Zhang Y, Zhao J, Wei H G, Shi J R, Zhao G, Zhang J Y, Gu Y Q, Ding Y K, Wen T S, Zhang W H, Hu X, Liu S Y, Zhang L, Tang Y J, Zhang B H, Zheng Z J, Nishimura H, Fujioka S, Wang F L, Takabe H, Zhang J 2010 *Phys. Plasmas* **17** 012701
- [15] Yuan D W, Li Y T, Liu X, Zhang Y, Zhong J Y, Zheng W D, Dong Q L, Chen M, Sakawa Y, Morita T, Kuramitsu Y, Kato T N, Takabe H, Rhee Y J, Zhu J Q, Zhao G, Zhang J 2013 *High Energ. Dens. Phys.* **9** 239
- [16] Albertazzi B, Ciardi A, Nakatsutsumi M, Vinci T, Beard J, Bonito R, Billette J, Borghesi M, Burkley Z, Chen S N, Cowan T E, Herrmannsdorfer T, Higginson D P, Kroll F, Pikuz S A, Naughton K, Romagnani L, Riconda C, Revet G, Riquier R, Schlenvoigt H P, Skobelev I Y, Faenov A Y, Soloviev A, Huarte-Espinosa M, Frank A, Portugall O, Pepin H, Fuchs J 2014 *Science* **346** 325
- [17] Fujioka S, Zhang Z, Ishihara K, Shigemori K, Hironaka Y, Johzaki T, Sunahara A, Yamamoto N, Nakashima H, Watanabe T, Shiraga H, Nishimura H, Azechi H 2013 *Sci. Rep.* **3** 1170
- [18] Gao L, Ji H T, Fiksel G, Fox W, Evans M, Alfonso N 2016 *Phys. Plasmas* **23** 043106
- [19] Pei X X, Zhong J Y, Sakawa Y, Zhang Z, Zhang K, Wei H G, Li Y T, Li Y F, Zhu B J, Sano T, Hara Y, Kondo S, Fujioka S, Liang G Y, Wang F L, Zhao G 2016 *Phys. Plasmas* **23** 032125
- [20] Rosenberg M J, Li C K, Fox W, Igumenshchev I, Séguin F H, Town R P J, Frenje J A, Stoeckl C, Glebov V, Petrasso R D 2015 *Phys. Plasmas* **22** 042703
- [21] Rosenberg M J, Li C K, Fox W, Igumenshchev I, Seguin F H, Town R P, Frenje J A, Stoeckl C, Glebov V, Petrasso R D 2015 *Nat. Commun.* **6** 6190
- [22] Zhang K, Zhong J Y, Wang J Q, Pei X X, Wei H G, Yuan D W, Yang Z W, Wang C, Li F, Han B, Yin C L, Liao G Q, Fang Y, Yang S, Yuan X H, Sakawa Y, Morita T, Cao Z R, Jiang S E, Ding Y K, Kuramitsu Y, Liang G Y, Wang F L, Li Y T, Zhu J Q, Zhang J, Zhao G 2015 *High Energ. Dens. Phys.* **17, Part A** 32
- [23] Nilson P, Willingale L, Kaluza M, Kamperidis C, Minardi S, Wei M, Fernandes P, Notley M, Bandyopadhyay S, Sherlock M, Kingham R, Tatarakis M, Najmudin Z, Rozmus W, Evans R, Haines M, Dangor A, Krushelnick K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 255001
- [24] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Rygg J R, Petrasso R D, Town R P, Landen O L, Knauer J P, Smalyuk V A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 055001
- [25] Zhong J Y, Lin J, Li Y T, Wang X, Li Y, Zhang K, Yuan D W, Ping Y L, Wei H G, Wang J Q, Su L N, Li F, Han B, Liao G Q, Yin C L, Fang Y, Yuan X, Wang C, Sun J R, Liang G Y, Wang F L, Ding Y K, He X T, Zhu J Q, Sheng Z M, Li G, Zhao G, Zhang J 2016 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **225** 30
- [26] Zhu B J, Li Y T, Yuan D W, Li Y F, Li F, Liao G Q, Zhao J R, Zhong J Y, Xue F B, He S K, Wang W W, Lu F, Zhang F Q, Yang L, Zhou K N, Xie N, Hong W, Wei H G, Zhang K, Han B, Pei X X, Liu C, Zhang Z, Wang W M, Zhu J Q, Gu Y Q, Zhao Z Q, Zhang B H, Zhao G, Zhang J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 261903
- [27] Landau L D, Lifshitz E M (translated by Li Z) 2013 *Fluid Mechanics* (Beijing: Higher Education Press) pp 359–411 (in Chinese) [朗道 L D, 栗弗席兹 E M 著 (李植译) 2013 流体力学 (第五版) (北京: 高等教育出版社) 第 359—411 页]
- [28] Kuramitsu Y, Sakawa Y, Morita T, Gregory C D, Waugh J N, Dono S, Aoki H, Tanji H, Koenig M, Woolsey N, Takabe H 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 175002

Strong magnetic fields generated with a metal wire irradiated by high power laser pulses and its effect on bow shock*

Li Yan-Fei¹⁾⁸⁾ Li Yu-Tong^{1)7)8)†} Zhu Bao-Jun¹⁾⁸⁾ Yuan Da-Wei²⁾ Li Fang¹⁾ Zhang Zhe¹⁾
 Zhong Jia-Yong³⁾⁷⁾ Wei Hui-Gang²⁾ Pei Xiao-Xing²⁾ Liu Chang³⁾ Yuan Xiao-Xia³⁾
 Zhao Jia-Rui¹⁾ Han Bo²⁾³⁾ Liao Guo-Qian¹⁾ Lu Xin¹⁾⁸⁾ Hua Neng⁴⁾ Zhu Bao-Qiang⁴⁾
 Zhu Jian-Qiang⁴⁾⁷⁾ Fang Zhi-Heng⁵⁾ An Hong-Hai⁵⁾ Huang Xiu-Guang⁵⁾⁷⁾
 Zhao Gang²⁾⁷⁾ Zhang Jie⁶⁾⁷⁾

1) (*Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

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

4) (*National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanical, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

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

6) (*Laboratory for Laser Plasmas (Ministry of Education) and Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

7) (*Collaborative Innovation Centre of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

8) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 21 December 2016; revised manuscript received 23 January 2017)

Abstract

Laboratory astrophysics is a rapid developing field studying astrophysical or astronomical processes on a high-power pulsed facility in laboratory. It has been proved that with the similarity criteria, the parameters in astrophysical processes can be transformed into those under laboratory conditions. With appropriate experimental designs the astrophysical processes can be simulated in laboratory in a detailed and controlled way. Magnetic fields play an important role in many astrophysical processes. Recently, the generation of strong magnetic fields and their effects on relevant astrophysics have attracted much interest. According to our previous work, a strong magnetic field can be induced by a huge current formed by the background cold electron flow around the laser spot when high power laser pulses irradiate a metal wire. In this paper we use this scheme to produce a strong magnetic field and observe its effect on a bow shock on the Shenguang II (SG II) laser facility. The strength of the magnetic field is measured by B-dot detectors. With the measured results, the magnetic field distribution is calculated by using a three-dimension code. Another bunch of lasers irradiates a CH planar target to generate a high-speed plasma. A bow shock is formed in the interaction of the high-speed plasma with the metal wire under the strong magnetic condition. The effects of the strong magnetic field on the bow shock are observed

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CBA01501), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11135012, 11375262, 11520101003, 11503041), and the Science Challenge Project (Grants No. TZ2016005).

† Corresponding author. E-mail: ytli@iphy.ac.cn

by shadowgraphy and interferometry. It is shown that the Mach number of the plasma flow is reduced by the magnetic field, leading to an increase of opening angle of the bow shock and a decrease of the density ratio between downstream and upstream. In addition, according to the similarity criteria, the experimental parameters of plasma are scaled to those in space. The transformed results show that the magnetized plasma around the wire, produced by X-ray emitted from the laser-irradiated planar target in the experiment, is suitable for simulating solar wind in astrophysics. In this paper, we provide another method to produce strong magnetic field, apply it to a bow shock laboratory astrophysical study, and also generate the magnetized plasma which can be used to simulate solar wind in the future experiments.

Keywords: high power laser, produce of strong magnetic fields, bow shock, magnetized plasma

PACS: 52.50.Jm, 52.70.Ds, 52.25.Xz, 42.30.-d

DOI: [10.7498/aps.66.095202](https://doi.org/10.7498/aps.66.095202)