

# 实验室天体物理的验证特例: W43A 磁喷流\*

裴晓星<sup>1)2)</sup> 仲佳勇<sup>1)3)†</sup> 张凯<sup>1)2)</sup> 郑无敌<sup>4)</sup> 梁贵云<sup>1)</sup>  
王菲鹿<sup>1)</sup> 李玉同<sup>5)</sup> 赵刚<sup>1)</sup>

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) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

5) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2014年2月17日收到; 2014年3月25日收到修改稿)

利用神光II号八路激光与平面Al靶相互作用产生双等离子体喷流. 利用阿尔芬-欧拉磁流体动力学标度变换理论产生的喷流与天体环境下形成的W43A喷流进行比较. 发现在实验室中直接测量的喷流物理量经过变换后, 与天文观测数据极其相似, 同时提出重联电场对喷流的形成与准直存在直接的影响.

**关键词:** 强激光, 高能量密度物理, 喷流

**PACS:** 52.38.Fz, 52.35.Vd

**DOI:** 10.7498/aps.63.145201

## 1 引言

喷流是天文观测中非常普遍和重要的现象之一, 在活动星系核 (AGN)、X 射线双星系统、以及原初恒星体 (YSOs)<sup>[1-3]</sup> 都观测到了尺度长达  $10^6$  pc 的喷流. 天体物理学家认为存在某种普遍的物理过程来决定喷流的连续结构形态<sup>[4,5]</sup>. 喷流的产生、准直、稳定性以及传输过程都是为理解喷流现象而急需解决的物理问题. 解决这些问题的传统方法是通过观测数据和数值模拟比较来得到, 尽管这种方法已经取得了很大的进展, 但是喷流的高度非线性以及多维度本质无法让目前的计算机对其做全数值化处理.

高能量密度等离子体在天体物理和激光等离子体物理领域存在许多相似点, 利用新型高能量密度物理实验装置 (如强激光、Z-pinch) 在实验室尺度研究天体尺度的高能量密度等离子体将有望取

得重大突破<sup>[6-9]</sup>. 近年来高能量密度物理方向中流体相关现象引起了人们的广泛关注, 例如激波和喷流现象. 通过标度变换关系可将大尺度的天体现象对应到小尺度的实验室等离子体中去, 这种可控的实验室研究为我们理解天体喷流提供了最为有利和直接的帮助.

Lebedev 等<sup>[10]</sup> 和 Gregory 等<sup>[11]</sup> 分别利用 Z-pinch 和强激光设备在实验室产生了高马赫数喷流. Farley 等<sup>[12]</sup>、Shigemori 等<sup>[13]</sup> 对喷流的传输做了研究, 考察了喷流在介质中的传输性质. 最近天文学家利用甚长基线射电望远镜阵 (VLBA) 对 W43A 喷流进行了观测, 发现这颗恒星喷射出的分子被高度卷曲的磁场约束形成非常窄的喷流<sup>[14]</sup>. W43A 是天鹰座中的一颗老年恒星, 正处在转变为行星状星云的过程当中, 它存在一对水分子喷流, 这一对喷流为理解行星状星云外形特征提供了线索. 天文观测提示我们, 在实验室中产生的喷流与磁场同样存在着重要关联. 考察磁场结构与喷流产

\* 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.

† 通讯作者. E-mail: [jyzhong@bao.ac.cn](mailto:jyzhong@bao.ac.cn)

生和传输的关系对于理解实验和完善激光等离子体理论模拟尤为重要。

本文利用神光II号八路激光与平面靶相互作用构建激光驱动等离子体磁重联, 产生了双等离子体喷流. 首次将磁流体标度变换运用于天体喷流与实验室喷流, 发现实验室产生的喷流与W43A天体喷流具有非常高的相似性. 我们认为W43A喷流现象可以作为一个实验室天体物理的验证特例, 并根据实验设计提出重联电场对等离子体喷流的产生和准直具有重要的作用。

## 2 实验布置与结果

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, 利用神光II号八路激光(波长 $\lambda_L = 0.351 \mu\text{m}$ )双面对称同步驱动 $50 \mu\text{m}$ 厚铝靶, 每两路激光叠合成一个焦斑, 每路驱动能量 $250 \text{ J}$ , 脉宽 $1 \text{ ns}$ ; 焦斑直径 $150 \mu\text{m}$ ; 同侧焦斑间距 $400 \mu\text{m}$ . 利用X射线针孔相机测量重联喷流区的X射线辐射, 针孔相机采用 $10 \mu\text{m}$ 的针孔和 $100 \mu\text{m}$ 厚的铍膜滤光片. 使用第九路短脉冲( $120 \text{ ps}$ )激光束( $\lambda_L = 0.53 \mu\text{m}$ )做探针光, 侧向穿越待测铝靶, 通过阴影成像和干涉法测量等离子体的演化, 获得等离子体喷流状态的瞬时图像。

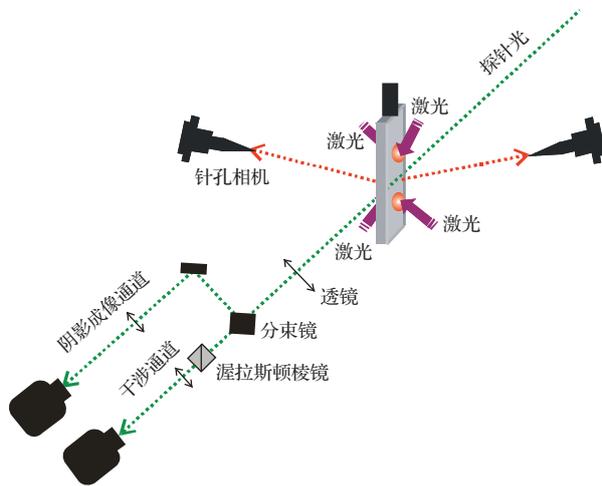


图1 实验布置图

实验结果如图2所示, 其中图2(a), (b)为针孔相机获得的靶面X射线图, 可以看到两个直径约 $150 \mu\text{m}$ 的焦斑, 间隔约有 $400 \mu\text{m}$ . 在两个激光焦斑之间存在较强的X射线辐射. 靶平面上方向相反的磁场(由红色和蓝色磁力线表示)足够接近时发生磁重联(重联后磁场由黑色磁力线表示), 在重联

区域产生垂直靶面向里的重联电场. 图2(c)为探针光延迟 $1 \text{ ns}$ 从靶的侧面获得的垂直于靶面的等离子体阴影图, 红色箭头为激光入射方向. 可以看到在铝靶两侧分别有两条高速等离子体喷流, 喷流位于两焦斑之间; 图中亮点显示的是一束激光焦斑位置(自发光), 根据等离子体喷流所在时刻的空间位置, 可以大概估算其速度约 $400 \text{ km/s}$ .

## 3 讨论

### 3.1 实验喷流与天体W43A喷流的物理参数对比

下面首先对实验室产生的喷流与天体喷流进行比较. 欧拉标度变换成功地将实验室中等离子体物理过程和超新星遗迹演化物理过程对应了起来, 如在实验室和天体中都观测到的瑞利泰勒不稳定性过程<sup>[15,16]</sup>. 而喷流的形成过程不同于超新星遗迹的演化, 由于喷流与磁场强烈相关, 所以需要采用的是磁流体动力学标度变换理论而不仅仅是流体力学标度变化. 在磁流体动力学方程<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) \\ = -\nabla p - \frac{1}{4\pi} B \times \nabla \times B \\ \frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) \\ \frac{\partial p}{\partial t} + v \cdot \nabla p = -\gamma p \nabla \cdot v \end{cases}, \quad (1)$$

这里 $\rho, v, p, B$ 和 $\gamma$ 分别为系统密度、速度、压强、磁场和绝热指数, 这四个方程分别表示了质量守恒、动量守恒、法拉第定律以及能量守恒。

可以看出方程组(1)在以下变换中不变:

$$\begin{cases} r = ar_1 \\ \rho = b\rho_1 \\ p = cp_1 \\ t = a\sqrt{\frac{b}{c}}t_1 \\ v = \sqrt{\frac{c}{b}}v_1 \\ B = \sqrt{c}B_1 \end{cases}, \quad (2)$$

该变换称为阿尔芬-欧拉变换。

表1列出了激光产生等离子体喷流的参数(第2列), 以及天文对W43A喷流观测得到的参数(第3列), 最后一列是采用阿尔芬-欧拉变换, 确定变换

系数  $a, b, c$  的情况下从实验室激光喷流参数得到的等效天体喷流参数. 压强也是标度变换中重要的一项, 天体观测和实验数据中都没有直接给出喷流压强的数据, 但是可以做如下的推断: 根据参考文献 [4], W43A 喷流中磁压是气体压强的 2—200 倍, 磁压  $p_B = B^2/2\mu_0$ , 如果取磁场强度  $B = 1.5 \text{ G}$ , 那么可以计算磁压约为  $0.01 \text{ Pa}$ , 那么喷流气体压强约为  $0.005 \text{ Pa}$ . 而实验室激光与铝靶相互作用产生的压强, 可以利用流体模拟程序来估算. 利用一维流体模拟程序 Medusa 计算得到靶面压强峰值约为  $10^{12} \text{ Pa}$ , 如果假设喷流压强与入射激光在靶面产生的压强相当, 这个压强如果乘上变换系数  $c$ , 得出对应天体喷流压强约为  $1 \text{ Pa}$ . 与第 3 列比较发现激光产生的喷流参数与天体 W43A 喷流的参数非常相似.

### 3.2 流体计算模拟

为考察磁场对实验的影响, 先采用非磁流体激光等离子体模拟程序 XRL2D<sup>[18]</sup> 进行模拟. XR-

L2D 程序是一套二维非平衡辐射流体力学程序, 其中电子、离子能量输运采用限流传导近似, 辐射输运采用多群扩散近似, 原子动力学采用平均原子模型, 激光吸收仅考虑了逆韧致吸收和共振吸收. 图 3 显示的模拟靶面单侧情况不同时刻的等离子体密度演化. 由于等离子体侧向挤压, 在两个等离子体团之间会形成一个类似喷流边界. 如果固定等离子体密度值比较, 可以发现模拟产生的喷流与激光等离子体基本混合在一起, 无法与实验中明显的准直喷流比较. 说明目前产生的等离子体属于磁流体, 应该考察磁场的作用.

### 3.3 重联电场加速喷流

在磁流体的情况下, 实验采用的激光打靶方式属于标准的激光驱动磁重联机制<sup>[19]</sup>, 如图 2 所示, 方向相反的磁场在两团等离子体中心发生断裂和重新联接, 这里激光等离子体的磁场主要来源于毕尔曼电池效应<sup>[20]</sup>.

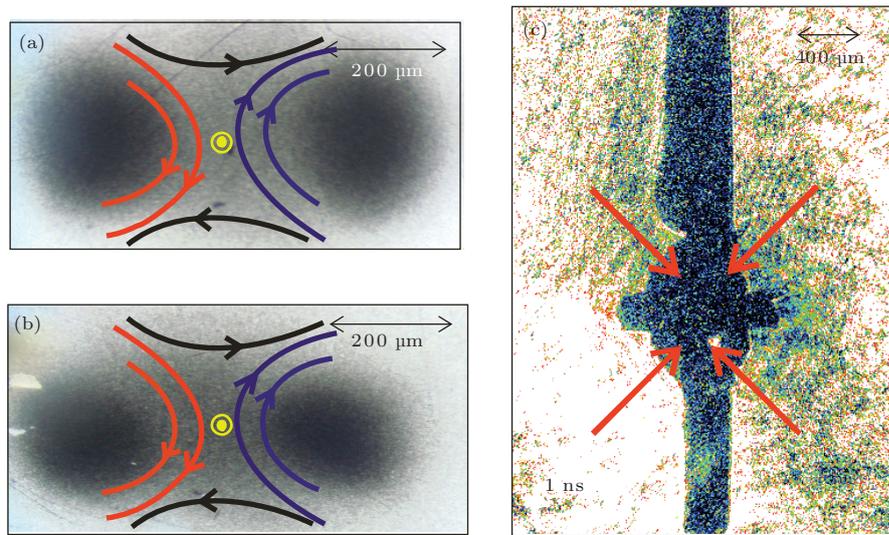


图 2 靶面 X 射线图和等离子体阴影成像 (a), (b) 分别为靶面两侧的 X 射线图; (c) 垂直于靶面的等离子体阴影成像图

表 1 激光等离子体喷流和天体喷流的欧拉相似 ( $a = 3 \times 10^{17}, b = 10^{-12}, c = 10^{-12}$ ) ( $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ )

参数	实验室激光喷流	W43A 喷流 <sup>[4]</sup>	实验室激光喷流 (标定值)
$r$	$400 \mu\text{m}$	900—1000 AU	800 AU
$B$	1.3 MG	1.5 G	1.3 G
$t$	1 ns	$10^9 \text{ s}$	$3 \times 10^8 \text{ s}$
$v$	$4 \times 10^7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$150 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$	$400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$
$\rho$	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$10^5 \text{ cm}^{-3}$	$10^7 \text{ cm}^{-3}$
$p$	$10^{12} \text{ Pa}$	0.005 Pa	1 Pa

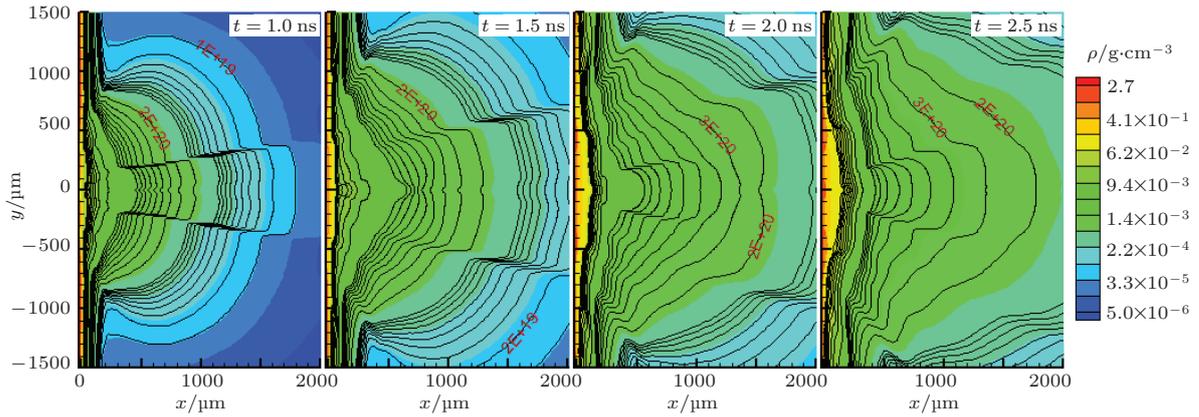


图3 (网刊彩色) 几个时刻等离子体电子密度  $N_e$  分布  $N_e$  等高线沿等离子体物质的低密度到高密度变化范围是  $10^{18} \text{ cm}^{-3} - 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

在垂直靶面方向由于磁场的快速变化, 会产生强的重联电场. 实验产生的喷流方向恰好与重联电场一致. 粒子模拟 [21,22] 显示重联电场由电子运动项、电子压力梯度项和电子惯性项所共同贡献. 在重联点附近, 重联电场主要是由电子压力梯度项贡献, 方向垂直于靶面向里. 这样的电场可以将电子快速加速到激光入射方向. 图4给出喷流加速准直的示意图. 此外该重联过程是三维过程, 不只在平面有重联发生, 而是在一定空间范围沿着喷流方向不断发生磁重联, 因此重联电场不断产生. 尽管由于磁重联过程中剩余磁场的作用会把大多数电子拉回重联流出方向, 但是由于三维效应, 重联电场会“接力”加速部分电子, 并在一定的加速空间限制喷流加速方向.

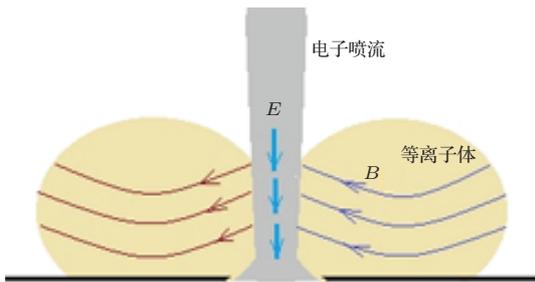


图4 重联电场加速准直喷流示意图

另外, W43A 喷流中磁压是气体压强的2—200倍表明磁耗散占主导, 等离子体 beta 远小于1, 而实验中激光等离子体压强数值要远大于天体喷流, 尽管标度变换后二者在观测误差范围内相似, 但说明激光等离子体存在以流体热压为主导的过程. 在激光驱动磁重联过程中, 发生重联的自生磁场是随着等离子体团在运动, 并且在较长时间内(2—3 ns)稳定. 下一步可以设计增加两束激光焦点分开的距

离, 降低等离子体作用区的密度, 进而实现低 beta 磁重联过程.

### 4 结 论

本文首次利用阿尔芬-欧拉磁流体动力学标度变换理论将激光与物质相互作用产生喷流与天体环境下形成的喷流进行了比较. 通过实验室直接测量的某些物理量来确定标度变换系数, 进而推导出 W43A 的其他喷流参数. 与天文观测数据比较发现, 二者极其相似. 实验和模拟结果表明, 重联电场可能对天体中某些喷流的形成与准直存在直接的作用.

### 参考文献

- [1] Nordhaus J, Blackman E G 2006 *Mon. Not. T. Astron. Soc.* **370** 2004
- [2] Guillermo G S, Jose A L, Jose F 2005 *Astrophys. J.* **618** 919
- [3] Mirabel I F, Rodriguez L F 1999 *Annu. Rev. Astron. Astr.* **37** 409
- [4] Blackman E G, Frank A, Markiel J A, Thomas J H, Van H, Hugh M 2001 *Nature* **409** 485
- [5] García-Segura G, López J A, Franco J 2005 *Astrophys. J.* **618** 919
- [6] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J 1984 *Rev. Mod. Phys.* **56** 255
- [7] Remington B A, Drake R P, Ryutov D D 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 755
- [8] Xia J F, Zhang J 2001 *Physics* **30** 545 (in Chinese) [夏江帆, 张杰 2001 物理 **30** 545]
- [9] Xia J F, Zhang J 2001 *Physics* **30** 210 (in Chinese) [夏江帆, 张杰 2001 物理 **30** 210]
- [10] Lebedev S V, Chittenden J P, Beg F N, Bland S N, Ciardi A, Ampleford D, Hughes S, Haines M G, Frank A, Blackman E G, Gardiner T 2002 *Astrophys. J.* **564** 113

- [11] Gregori G, Glenzer S H, Knight J, Niemann C, Price D, Froula D H, Edwards M J, Town R P J, Brantov A, Rozmus W, Bychenkov V Yu 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 205006
- [12] Farley D R, Estabrook K G, Glendinning S G, Glenzer S H, Remington B A, Shigemori K, Stone J M, Wallace R J, Zimmerman G B, Harte J A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 1982
- [13] Shigemori K, Kodama R, Farley D R, Koase T, Estabrook K G, Remington B A, Ryutov D D, Ochi Y, Azechi H, Stone J, Turner N 2000 *Phys. Rev. E* **62** 8838
- [14] Vlemmings W H T, Diamond P J, Imai H 2006 *Nature* **440** 58
- [15] Arnett W D 1988 *Astrophys. J.* **331** 377
- [16] Remington B A, Arnett D, Drake R P, Takabe H 1999 *Science* **284** 1488
- [17] Ryutov D D, Drake R P, Remington B A 2000 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **127** 465
- [18] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439
- [19] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G, Wang J Q, Dong Q L, Wang S J, Liu X, Zhang L, An L, Wang F L, He X T, Zhu J Q, Gu Y, Zhao G Zhang J 2010 *Nat. Phys.* **6** 984
- [20] Stamper J A 1991 *Laser Part. Beams* **9** 841
- [21] Fox W, Bhattacharjee A, Germaschewski K 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 215003
- [22] Lu Q M, Lu S, Huang C, Wu M Y, Wang S 2013 *Plasma Phys. Control. Fusion* **55** 085019

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

Pei Xiao-Xing<sup>1)2)</sup> Zhong Jia-Yong<sup>1)3)†</sup> Zhang Kai<sup>1)2)</sup> Zheng Wu-Di<sup>4)</sup> Liang Gui-Yun<sup>1)</sup>  
Wang Fei-Lu<sup>1)</sup> Li Yu-Tong<sup>5)</sup> Zhao Gang<sup>1)</sup>

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 Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

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

( Received 17 February 2014; revised manuscript received 25 March 2014 )

### Abstract

Dual Al plasma jets are generated with eight Shenguang II lasers. With Euler MHD scale law we find that the jet produced in the laboratory is highly similar to astronomical observations after transformation. We propose that the reconnection electric field should have a possible direct influence on the formation and collimation of the plasma jet.

**Keywords:** high energy density physics, high power laser, jets

**PACS:** 52.38.Fz, 52.35.Vd

**DOI:** 10.7498/aps.63.145201

\* 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@bao.ac.cn](mailto:jyzhong@bao.ac.cn)