

双等离子体团相互作用的磁流体力学模拟

原晓霞 仲佳勇

Simulations for two colliding plasma bubbles embedded into an external magnetic field

Yuan Xiao-Xia Zhong Jia-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 075202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.075202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.075202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光驱动磁重联过程中的喷流演化和电子能谱测量

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

物理学报.2015, 64(16): 165201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.165201>

等离子体密度对激光拉曼放大机理的影响

Plasma density effect on backward Raman laser amplification

物理学报.2015, 64(10): 105201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105201>

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>

超短超强激光与薄膜靶相互作用中不同价态碳离子的来源

Origin of energetic carbon ions with different charge states in ultrashort laser-thin foil interactions

物理学报.2013, 62(16): 165201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.165201>

双等离子体团相互作用的磁流体力学模拟*

原晓霞¹⁾ 仲佳勇^{1)2)†}

1)(北京师范大学天文系, 北京 100875)

2)(IFSA 协同创新中心, 上海交通大学, 上海 200240)

(2016年10月24日收到; 2017年1月6日收到修改稿)

利用商用磁流体力学模拟程序 USIM 对双等离子体团相互作用过程进行了数值模拟, 分别考察和比较了双对流等离子体团在外加磁场和无外加磁场情况下, 相互作用的物理过程. 发现在外加磁场情况下等离子体团相互作用会伴随着磁重联(反向磁场)、磁排斥(同向磁场)以及一些不稳定过程. 针对激光产生等离子体团错位相互作用实验, 进行了标度模拟, 发现外加磁场起着重要作用, 进一步表明激光等离子体的磁化特征. 研究结果为下一步在神光 II 激光装置进行强磁环境下等离子体实验提供理论指导.

关键词: 强激光, 磁重联, 冲击波

PACS: 52.65.-y, 52.38.Mf, 52.35.Vd, 52.30.Cv

DOI: 10.7498/aps.66.075202

1 引言

多等离子体团相互作用的物理过程普遍存在于天体和实验室等离子体中, 如在天体星系并合、活动星系核间产生间歇性喷流^[1], 太阳耀斑触发^[2]等, 实验室多路激光与靶相互作用^[3]产生的多点团等离子体以及利用 Z 箍缩多线阵放电等离子体相互作用^[4]等. 由于这种普适性, 多等离子体团相互作用的物理现象成为近年来实验室天体物理研究的主要热点问题之一.

由多等离子体相互作用, 通过加热并挤压星际间的等离子体产生的无碰撞冲击波普遍存在于太阳风和超新星遗迹^[5,6]现象中. 宇宙射线和高能粒子的产生与无碰撞冲击波存在密切的关系. 在实验室中, 可以通过研究等离子体对流碰撞产生无碰撞冲击波. Liu 等^[6]通过强激光与两个对向放置的平面靶相互作用产生等离子体团, 等离子体团经过相互作用形成无碰撞静电冲击波, 数值模拟表明由静电不稳定性^[7]可以在低密的非相对论等离子体中产生无碰撞静电冲击波. Kato 等^[5]在激光等离子

体对流碰撞的实验中外加了磁场, 实验证实当用长脉冲激光进行实验时, 在激光等离子体中外加磁场可以产生弓形波, 并且等离子体密度分布在有磁场和无磁场的情况下是不同的^[8].

磁化等离子体团相互作用也可以用来研究磁场重联物理过程, Zhong 等^[2]利用神光 II 激光装置建立了与太阳耀斑相似的磁重联拓扑结构, 同时确定了由磁重联造成的一定区域内离子在其惯性长度上与电子解耦. Zhang 等^[9]利用同样的装置模拟了太阳风与极区磁场的相互作用, 在实验中可以认为通过激光驱动磁重联产生一个微型耀斑, 产生的出流等离子体与太阳风相当.

近年来, 越来越多的科学家进行了非对称等离子体相互作用的理论与实验的探索, Malakit 等^[10]通过理论模拟给出了在非对称磁重联中存在区别于霍尔电场的“拉莫尔电场”. Rosenberg 等^[11]设计了强激光驱动等离子体实验来探究非对称磁重联, 发现磁重联率对于初始的非对称磁场并不敏感. 本文利用商用磁流体力学模拟程序 (USIM) 针对错位的双等离子体团相互作用进行模拟; 在双等

* 北京科技新星(批准号: Z131109000413050)、国家自然科学基金(批准号: 11622323)和中央高校基本科研业务费专项资金科学挑战专题(批准号: JCKY2016212A505)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jyzhong@bnu.edu.cn

离子体团相互作用过程中模拟了背景无外加磁场、外加同向磁场以及外加反向磁场等情况,在模拟中观测到了双等离子体团相撞而伴随的冲击波、磁排斥以及磁重联丰富的物理现象;同时给出了神光实验中出现非对称的“桃形结构”等离子体的可能原因.

2 理论模拟模型

本文采用可提供广泛变量的商用等离子体流体模拟程序——USIM. USIM支持很多种模型,例如电磁双流体5分量模型和10分量模型、中性黏滞可压缩流体模型、电阻式与霍尔磁流体力学(Hall-MHD)模型,还可以用来求解麦克斯韦方程.这些

解可在贴体网格与非结构网格中得到.另外USIM还具有高度模块化、并行等特点,它应用有限体积与有限元算法的激波捕捉代码,支持结构化与非结构化的网格. USIM包含简单的辐射损失模型,可以用来研究辐射效应,尤其是在光学薄极限下的惯性约束核聚变实验中可以应用^[12]. 本文利用USIM模拟双等离子体团相互作用过程,使用的模型是理想MHDeos^[13],其包含了一般的状态方程(EOS)以及韧致辐射、无电阻效应,磁场被冻结在流体中运动,电场只有洛伦兹项 $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (\mathbf{E} 为电场, \mathbf{v} 为流体速度, \mathbf{B} 为磁场),磁压是电磁场对等离子体作用的主要方式.将磁流体力学方程按照分量的形式可以写成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ \rho u_z \\ e \\ B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho u_x & \rho u_y & \rho u_z \\ \rho u_x^2 + P - \frac{1}{2\mu_0} B_x^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 & \rho u_x u_y - \frac{1}{\mu_0} B_x B_y & \rho u_x u_z - \frac{1}{\mu_0} B_x B_z \\ \rho u_y u_x - \frac{1}{\mu_0} B_x B_y & \rho u_y u_y + P - \frac{1}{2\mu_0} B_y^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 & \rho u_y u_z - \frac{1}{\mu_0} B_y B_z \\ \rho u_z u_x - \frac{1}{\mu_0} B_x B_z & \rho u_z u_y - \frac{1}{\mu_0} B_z B_y & \rho u_z u_z + P - \frac{1}{2\mu_0} B_z^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \\ u_x \left(e + P + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) - \frac{1}{\mu_0} B_x B \cdot u & u_y \left(e + P + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) - \frac{1}{\mu_0} B_y B \cdot u & u_z \left(e + P + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) - \frac{1}{\mu_0} B_z B \cdot u \\ 0 & -(u_x B_y - u_y B_x) & u_x B_z - u_z B_x \\ u_x B_y - u_y B_x & 0 & -(u_y B_x - u_x B_y) \\ -(u_y B_x - u_x B_y) & u_x B_y - u_y B_x & 0 \end{pmatrix} = 0, \quad (1)$$

方程中 ρ 为密度; u_x, u_y, u_z 分别是 X, Y, Z 方向的分速度; e 为能量; B_x, B_y, B_z 分别是 X, Y, Z 方向的磁感应强度; P 为辅助变量,是总的流体压力.当无外加磁场时,相当于取 B_x, B_y, B_z 为零.本文中展示的是二维结果,但是模型中 Z 方向的分量仍保留.当网格精度设置比较低时,模拟结果可能会受到数值分布的影响,得到非物理因素的误差,因此在模拟中网格精度应设置在较高的水平.

本文中初始等离子体团密度分布由(2)和(3)式决定,各参数分别是 $R = 4.0 \cdot 10^{-5}$ m(径向标长(高斯分布)), $z_d = 9.0 \cdot 10^{-5}$ m(密度标长)、 $\alpha = 3.8$ (常数)、 $r = \sqrt{2y^2 + z^2}$ (径向密度截止长度),分别在网格中定义,可以通过改变 R, z_d, α 的值以及 r 的表达式来改变等离子体团的密度分布以及外形,

(2)和(3)式的系数由表1给出.

$$n_i(r, x) = A_n G(r) \left(\frac{x}{\alpha Z_d} \right)^\alpha e^{-\alpha \left(\frac{x}{Z_d} \right)}, \quad (2)$$

$$G(r) = e^{-\frac{r^2}{R^2}}. \quad (3)$$

表1 等离子体外形参数

Table 1. The parameters of the plasma configuration.

参量	数值	单位	描述
T_0	100.0	eV	电子与离子的温度
v_0	2.0×10^5	m/s	等离子体团运动的速度
A_n	1.0	$1/\text{m}^3$	离子密度峰值
R	4.0×10^{-5}	m	径向标长(高斯分布)
z_d	9.0×10^{-5}	m	密度标长
α	3.8		常数

3 实验和模拟结果

在高功率激光物理国家实验室“神光II”激光装置上进行了双等离子体团相互作用实验. 图1(a)所示为神光II号四路激光(波长 $\lambda_L = 0.351 \mu\text{m}$)同步烧蚀 $50 \mu\text{m}$ 厚铝靶, 每两路激光叠合成一个焦斑, 每路激光能量 250 J , 脉宽 1 ns , 焦斑直径 $150 \mu\text{m}$, 焦斑间距 $400 \mu\text{m}$. X射线针孔相机用来测量来自激光靶点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^[14].

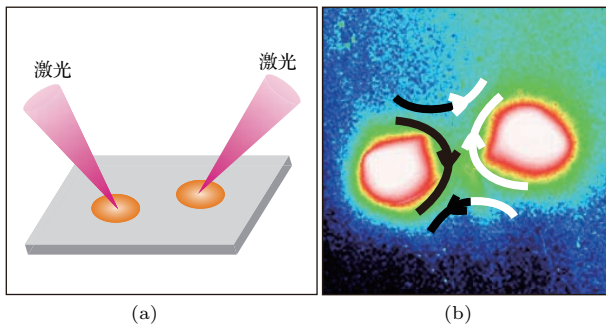


图1 (网刊彩色) (a) 实验布置示意图; (b) X射线针孔相机实验结果

Fig. 1. (color online) (a) Schematic of experimental setup; (b) image taken by the X-ray pinhole camera.

图1(b)所示为X射线针孔相机获得的X射线辐射的时间积分图. 可以看到相互作用区内的两个等离子体团呈现“桃形结构”, 而之前的实验结果^[2]呈现的是对称的等离子体团结构, 这种差异出现的原因可能是左右两个等离子体团上下出现了错位. 同时可以看到, 在两个等离子体团中间下方出现了较强的X射线辐射. 根据激光驱动磁重联实验, 在靶平面上方向相反的磁场(由黑色与白色磁力线表示)逐渐靠近时, 会发生磁重联(重联后磁场由黑白相接的磁力线表示), 从而会在两团等离子体中间产生等离子体出流. 对于这种假设, 我们利用USIM软件进行了错位双等离子体团相互作用的模拟, 同时对比了无外加磁场与外加磁场时的情况.

在对双等离子体团相互作用过程进行数值模拟时, 因为等离子体团的产生与激光没有关系, 为节省计算时间, 等离子体团间距可适当减小, 故取初始时刻双等离子体团在 X 方向上相距 $200 \mu\text{m}$. Y 方向上相错 $30 \mu\text{m}$, 初始的双等离子体团长度与宽度均为 $150 \mu\text{m}$. 实验中利用高能激光轰击固体靶后, 形成两团随时间膨胀的等离子体, 最终两团等

离子体会碰撞在一起. 为了模拟这种现象, 我们设置的等离子体团是相向运动, 并最终发生碰撞, 以与实验进行比较. 模拟中等离子体团的运动速度取值为 200 km/s , 与实验测量值相近. 模拟时我们采用了 500×500 的网格, 提高网格的精度有利于获得更加准确的模拟结果. 模拟主要考虑到未来在神光激光装置上要进行外加 $1\text{--}10 \text{ T}$ 量级磁场的实验, 如线圈电容装置等, 采用这个量级的磁场, 便于对实验给予一定理论指导. 此外模拟中磁场大小会影响等离子体运动的回旋半径, 进而影响程序计算时间. 通过模拟发现 1 T 不仅接近实验目标, 而且计算时间合理, 因此我们采用了 1 T 的外加磁场. 本文中并没有考虑等离子体自生磁场, 外加的均匀磁场与等离子体自生磁场拓扑结构不同, 但是磁场相互作用所产生的磁重联、磁排斥现象的机制是相同的. 本文意在给出外加磁场对等离子体的影响, 对将来在实验中外加磁场有一定指导意义. 我们分别模拟了以下五种情况: 1) 无外加磁场; 2) 在 Y 方向上加 1 T 的磁场, 也称为在 Y 方向加同向磁场; 3) 在 Y 方向上, 以 $x = 0$ 为界, 在左侧加 1 T 正向磁场, 在右侧加 1 T 的负向磁场, 也称在 Y 方向上加反向磁场; 4) 在 X 方向上加 1 T 的磁场; 5) 在 Z 方向上加 1 T 的磁场.

图2(a), (b), (c), (g), (h)分别是五种情况下 0.7 ns 时的密度分布图, 可以看到在 X, Z 方向上加磁场时(即第4种情况和第5种情况), 与无外加磁场(即第1种情况)结果相似. 在 X 方向加磁场时, 等离子体沿着磁场线运动, 故不会受到磁场的影响. 而在 Z 方向加磁场时, 在三维情况下, 与在 Y 方向加磁场现象相同, 但是我们选取的是 $X\text{-}Y$ 二维结果, 故看不出不同. 而在 Y 方向加同向和反向磁场(即第2种和第3种情况)时, 情况大不相同, 在 Y 方向加了同向磁场(即第2种情况)与加反向磁场(即第3种情况)时在 0.4 ns 时均出现了冲击波, 在 0.7 ns 冲击波更加明显, 如图2(b)和图2(c)所示的等离子体团前方的弓形结构. 图3(a)和图3(b)为图2(b)和图2(c)中白色线处密度的一维展开图, 可见图3(a)中红色箭头所指的两个密度峰值是图2(b)中的弓形结构, 说明此处发生了密度的跳变, 由模拟结果可得到其波震面宽度约 $4 \mu\text{m}$. 同时由模拟结果得到此时弓形结构处的等离子体运动速度 v 约为 100 km/s , 而声速 $v_s = \sqrt{\Gamma P/\rho}$ 约 40 km/s (Γ 为绝热指数, P 为压强, ρ 为密度), $v > v_s$, 说明此处的弓形结构是冲击波. 图3(b)中

只有一个密度峰值,这是由于发生了磁重联,等离子体团相互作用耦合在一起,其波震面宽度约为 $6\ \mu\text{m}$. 此时, Y 方向加同向磁场(即第2种情况)时,

同向磁场被等离子体向中间挤压,中间形成了高密度磁场区,图4(a)中可看到高密磁场区为红色箭头所指黑色部分,出现了磁排斥现象,从而延缓

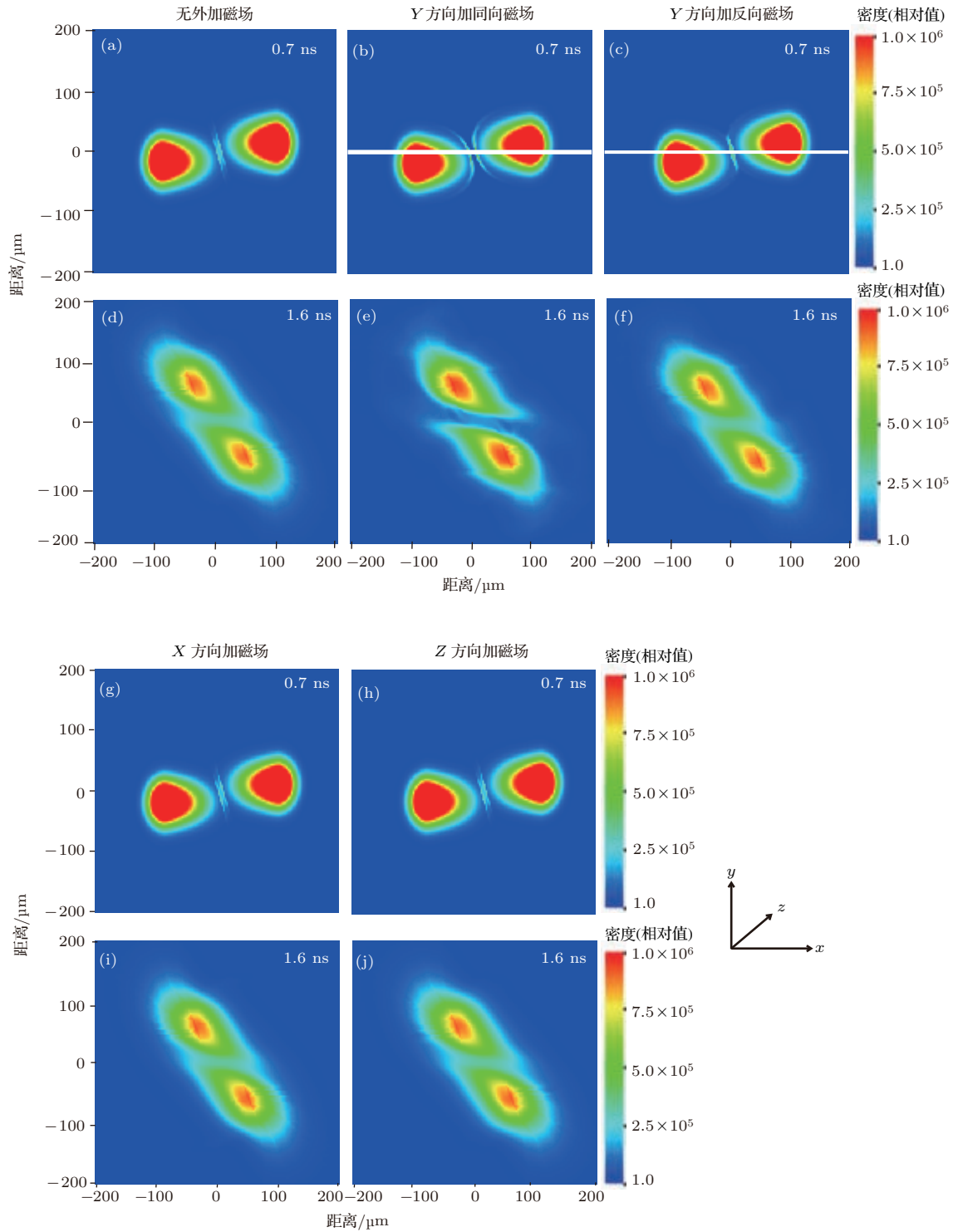


图2 (网刊彩色) 双等离子体团相互作用分别在0.7 ns和1.6 ns时刻的密度分布图 (a), (d) 无外加磁场; (b), (e) Y 方向加同向磁场, $B_y = 1\ \text{T}$; (c), (f) Y 方向加反向磁场, $B'_y = 1\ \text{T}$; (g), (i) X 方向加磁场, $B_x = 1\ \text{T}$; (h), (j) Z 方向加磁场, $B_z = 1\ \text{T}$

Fig. 2. (color online) The distribution of density at 0.7 ns and 1.6 ns respectively: (a), (d) No magnetic filed; (b), (e) embedding the same Y directional magnetic field, $B_y = 1\ \text{T}$; (c), (f) embedding the reversal Y directional magnetic field, $B'_y = 1\ \text{T}$ (positive magnetic at the left side, negative at the right side); (g), (i) embedding X directional magnetic field, $B_x = 1\ \text{T}$; (h), (j) embedding Z directional magnetic field, $B_z = 1\ \text{T}$.

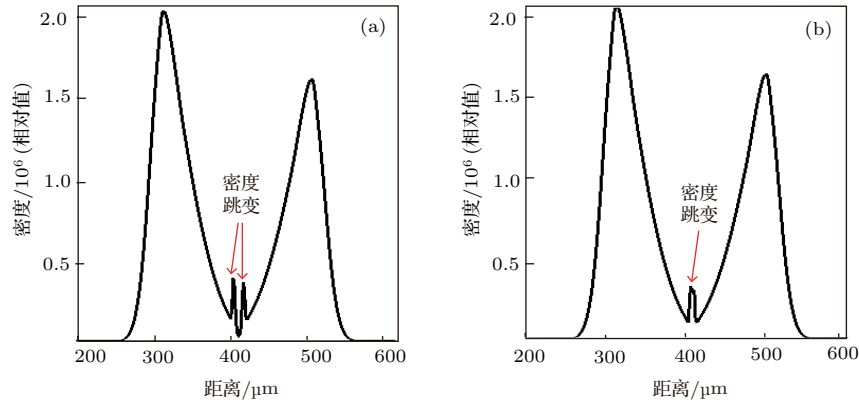


图3 (a), (b) 分别为 Y 方向加同向与反向磁场 0.7 ns 时 $x = 0$ 的一维密度展开图

Fig. 3. (a), (b) One dimensional figures of density at $x = 0$ of Fig. 2(a) and (b) at 0.7 ns.

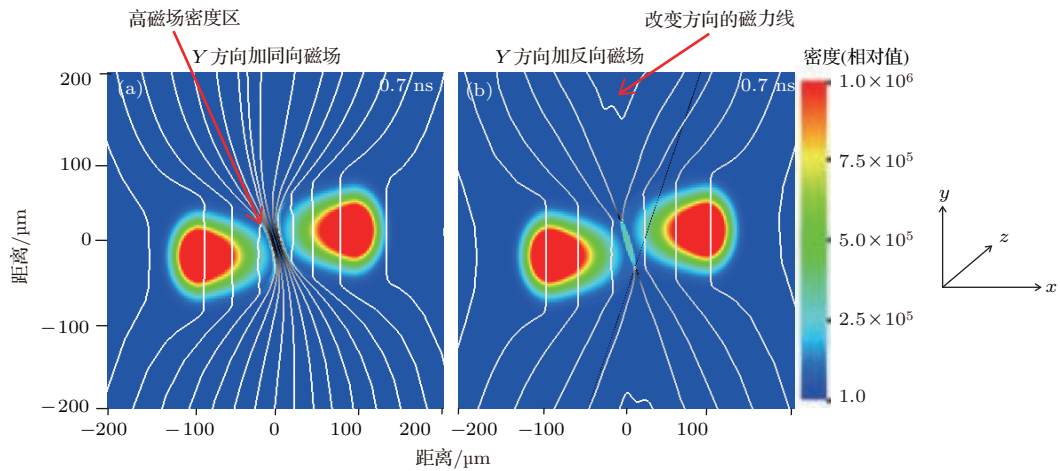


图4 (网刊彩色) (a), (b) 分别为 Y 方向加同向磁场与加反向磁场 0.7 ns 时的磁场分布图

Fig. 4. (color online) (a), (b) The distribution of the magnetic lines embedding the same and the reversal Y directional magnetic fields at 0.7 ns.

了等离子体团的碰撞. 而加反向磁场 (即第 3 种情况) 时, 反向磁力线随着等离子体团一起运动, 逐渐接近时发生了磁重联, 图 4(b) 中的磁力线的分布如红色箭头所指的已发生改变, 因此磁力线不再堆积. 这与我们的实验相一致. 实验中等离子体团产生的自生磁场的磁力线的方向也是沿着 Y 方向分布. 同时由于模拟所加初始的磁场是竖直的, 初始时磁力线与等离子体团冻结在一起, 之后磁力线一直保持初始状态随着等离子体团一起运动. 因此, 图 4(a) 与图 4(b) 中, 等离子体内部的磁力线是竖直的, 而外部磁力线受到等离子体团的挤压拖拽发生了形变.

对比五种情况下 0.7 ns 时的密度分布图可以看到, 只有在 Y 方向加反向磁场时 (即第 2 种情况) 两个等离子体团中间相互作用的区域是一个整体结构, 而其他情况下均是两个结构, 这是由于磁重

联的发生使两边的等离子体耦合在一起不分彼此的聚集到中间形成一个整体.

图 2 中 (d), (e), (f), (i), (j) 分别是五种情况下 1.6 ns 时的密度分布图. 此时等离子体团经过充分的相互作用, 并开始相互远离, 仍然是两个密度中心, 且各自外形呈桃形. 由于在 X 射线针孔相机曝光时间内, $I(v, T_e) \propto \frac{\rho^2}{\sqrt{T_e}} e^{-\frac{h\nu}{kT_e}}$, I 是射线强度, v 是等离子体速度, T_e 是电子温度, ρ 是等离子体密度, $I \propto \rho^2$, 可直接用密度的平方表示 X 射线成像. 因此, 我们认为出现桃形结构的可能原因是双等离子体团在 Y 方向上出现了上下的错位, 与实验结果相似.

同时由图 2(e) 可以看到, 在 Y 方向加同向磁场 (即第 2 种情况) 时, 两团等离子体较其他情况下的先分离. 同时, 同向磁力线在排斥过程中发生弯曲, 而等离子体形态也随之一起弯曲, 使得其尖端

部分出现较其他情况下更大的弯曲. 并且这种情况下等离子体团中心密度要比其他情况下的高一些, 由其密度中心的红色部分可以看出. 同时这种情况下等离子体团边界形状不规则, 出现不稳定的现象. 由图 2(f) 可以看到, 在 Y 方向加反向磁场 (即第 3 种情况) 时, 由于磁力线不断地重联, 两个等离子体团分离的速度较慢. 同时从图 2 和图 4 中 0.7 ns 和 1.6 ns 的密度图可以看到, 似乎两团等离子体在各种外磁场情况下均偏转了较大的角度. 这是由于两团等离子体是在 Y 方向有 30 μm 的错位, 当它们高速运动并发生碰撞时, 两个等离子体团会以其碰撞的位置为中心, 发生旋转, 所以会偏离较大的角度. 综合以上模拟情况, 并与实验结果比较, 反向磁场更加符合实验结果. 伴随反向磁场发生的磁重联导致了耗散区等离子体呈整体分布结构, 而双等离子体的错位导致了桃形结构的出现. 在理论上, 虽然外加磁场对等离子体的动力学影响与自生磁场对等离子体的影响有相似之处, 但仍然不能完全取代. 进一步理论模拟需采用双流体模型, 构建等离子体自生磁场模型. 在实验上, 需要进一步提高空间分辨能力, 测出等离子体自生磁场的分布.

4 结 论

利用商用程序 USIM 模拟了在 Y 方向上下错位的等离子体团在无外加磁场和分别加不同方向磁场时密度以及磁场的演化情况. 发现在 Y 方向加同向磁场时出现了冲击波, 同时伴随着磁排斥的现象; 在 Y 方向加反向磁场时出现了冲击波与磁重联现象. 实验结果中的桃形结构出现的可能原因是双等离子体团在 Y 方向上下错位, 同时发生磁重联造成两个等离子体团中间出流的形成. 对外加磁场对多等离子体团相互作用的影响的理解可为未来在神光装置进行强磁环境等离子体的实验设计提供帮助.

参考文献

- [1] Schrafel P, Bell K, Greenly J, Seyler C, Kusse B 2015 *Phys. Rev. E* **91** 013110
- [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 *Nature Phys.* **6** 984
- [3] Fiksel G, Fox W, Bhattacharjee A, Barnak D H, Chang P Y, Germaschewski K, Hu S X, Nilson P M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 105003
- [4] Chittenden J P, Mitchell I H, Aliaga-Rossel R, Bayley J M, Beg F N, Lorenz A, Haines M G, Decker G 1997 *Phys. Plasmas* **4** 2967
- [5] Kato T N, Takabe H 2008 *Astrophys. J.* **681** L93
- [6] Liu X, Li Y T, Zhang Y, Zhong J Y, Zheng W D, Dong Q L, Chen M, Zhao G, Sakawa Y, Morita T 2011 *New J. Phys.* **13** 1433
- [7] Suzuki-Vidal F, Lebedev S V, Ciardi A, Pickworth L A, Rodriguez R, Gil J M, Espinosa G, Hartigan P, Swadling G F, Skidmore J, Hall G N, Bennett M, Bland S N, Burdiak G, de Grouchy P, Music J, Suttle L, Hansen E, Frank A 2015 *Astrophys. J.* **815** 96
- [8] Morita T, Sakawa Y, Kuramitsu Y, Dono S, Aoki H, Tanji H, Kato T N, Li Y T, Zhang Y, Liu X, Zhong J Y, Takabe H, Zhang J 2010 *Phys. Plasmas* **17** 122702
- [9] 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 Energy Density Phys.* **17** 32
- [10] Malakit K, Shay M A, Cassak P, Ruffolo D J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 135001
- [11] 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 *Nat. Commun.* **6** 6190
- [12] Loverich J, Zhou S C D, Beckwith K, Kundrapu M, Loh M, Mahalingam S, Stoltz P, Hakim A 2013 *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition Grapevine, Texas, America, January 7–10, 2013* p1185
- [13] Loverich J, Hakim A 2010 *J. Fusion Energ.* **29** 532
- [14] 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]

Simulations for two colliding plasma bubbles embedded into an external magnetic field*

Yuan Xiao-Xia¹⁾ Zhong Jia-Yong^{1)2)†}

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

2) (Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(Received 24 October 2016; revised manuscript received 6 January 2017)

Abstract

A commercial magnetohydrodynamic (MHD) simulation package USIM is used to simulate two colliding plasma bubbles, which are not moving in the same horizontal line along the X direction. One similar experiment is performed on Shengguang II laser facility, in which four laser beams each with a wavelength of $0.351\ \mu\text{m}$, total energy of $1.0\ \text{kJ}$, pulse duration of $1\ \text{ns}$, are irradiated on an Al target with a thickness of $50\ \mu\text{m}$. Every two beams constitute one $150\text{-}\mu\text{m}$ -diameter focal spot with an intensity of $10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$. The X-ray radiation results show the asymmetric and peach-like plasma bubbles, which are different from the results obtained before. Here we report the possible reason for the asymmetric and peach-like structure in experiment. External magnetic field on the order of $1\ \text{T}$ is chosen to perform the simulations, which could be a possible applied B field in future experiments performing on the Shengguang II laser facility.

In the simulations, different cases, especially the effects of different directional external magnetic fields, are considered. When the reversal directional magnetic fields are embedded in the Y direction, the magnetic field lines are frozen in the plasma bubbles, moving and approaching to each other gradually with the magnetic field lines. The change of the direction of magnetic field lines in the interaction region indicates that the magnetic reconnection has been happened. The outflows between two plasma bubbles in the experimental result could be explained by magnetic reconnection, which can efficiently convert stored magnetic energy into kinetic energy and thermal energy by accelerating and heating plasma particles. The density jump at the position of the bow structure indicates the generation of shock waves, where the velocity of flow v is also larger than the sound speed v_s . When the same directional attractive magnetic fields are embedded in the Y direction, magnetic field lines are piled up in the central part, where the magnetic field density is high, which indicates that the magnetic repulsion has been happened. Magnetic repulsion also delays the colliding between two plasma bubbles. The shock waves each with a width of $4\ \mu\text{m}$ are also found in this case. The X-ray images in experiment and the density images in simulations show the similar peach-like structures, where the density results could be used to explain the X-ray radiation result for, $I(v, T_e) \propto \frac{\rho^2}{\sqrt{T_e}} e^{(-\frac{h\nu}{kT_e})}$, I is the radiation intense, v is the plasma velocity, T_e is the electron temperature, ρ is the plasma density. Magnetic reconnection is the possible reason for the asymmetrical and peach-like structure in the experiment by comparing all kinds of simulation cases. The present simulation results will be of benefit to the future designing of experimental setup on the Shengguang II laser facility, although a two-fluids model is needed to build a spontaneous magnetic field for the real plasma bubbles.

Keywords: intense lasers, magnetic reconnection, shock wave

PACS: 52.65.-y, 52.38.Mf, 52.35.Vd, 52.30.Cv

DOI: 10.7498/aps.66.075202

* Project supported by the Beijing Nova Program (Grant No. Z131109000413050), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11622323), the Fundamental Research Funds for the Central Universities and Science Challenge Project, China (Grant No. JCKY2016212A505).

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