

文章编号: 1000-8349(2010)04-348-11



磁场重联实验室模拟进展

张寿彪¹, 谢锦林¹, 胡广海¹, 李 弘¹, 黄光力², 刘万东¹

(1. 中国科学技术大学 近代物理系 中国科学院基础等离子体物理实验室, 合肥 230027; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008)

摘要: 磁场重联是空间等离子体和实验室等离子体中的常见现象, 被认为是太阳耀斑和磁层亚暴的重要机制。实验室磁场重联的模拟研究已经有二十余年的历史, 并且取得了一系列重要的结果。对几个主要的磁场重联实验装置进行了介绍, 给出了各个装置的等离子体参数以及产生重联的方法, 回顾了实验室研究中和太阳射电密切相关的几个问题。另外, 以中国科技大学的线性磁化等离子体装置为基础, 建立了国内首个磁场重联的实验装置, 研制了实验中需要的诊断工具, 并开展了初步的磁场重联实验。

关 键 词: 等离子体; 磁场; 湍流; 实验室

中图分类号: P182.7, P353.4 **文献标识码:** A

1 引 言

磁场重联过程伴随着磁力线的断开和重联连接, 能够导致磁力线拓扑形状的改变。磁场重联提供了一种将磁能快速转化为等离子体动能和热能的有效机制, 太阳耀斑、磁层亚暴以及托卡马克中的锯齿振荡等过程中的能量转换都被认为和磁场重联密切相关^[1-4]。太阳观测卫星 Yohkoh^[5] 以及地球磁层观测卫星 Wind^[6]、Cluster^[7] 等已经发现了磁场重联过程的发生, 其过程伴随着等离子体的加热、加速以及等离子体湍流等现象。为了深入理解磁场重联的物理过程, 实验室中也开展了磁场重联的模拟研究, 实验室中的等离子体参数及边界条件能够比较容易地被控制和改变, 诊断过程也相对比较容易, 因此实验室中的磁场重联模拟能够更直接和详细地理解磁场重联的物理机制。

在磁场重联研究早期, Sweet^[8] 和 Parker^[9] 根据太阳耀斑活动的观测资料, 在 2D 磁流

收稿日期: 2010-03-05 ; 修回日期: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10333030 , 40390155 , 10605025) ; 中国科学院知识创新工程项目 (kjcx-yw-n28)

体的基础上首先提出了稳态磁场重联的理论模型。电流片位于一个长而窄的扩散区中, 扩散区两侧由等离子体携带磁场从两侧流向电流片, 磁力线被切断并发生重联, 所携带磁场在边界层通过焦耳加热而耗散, 转化为等离子体的热能和动能。这个模型给出了重联率 M_A (入流速度和出流速度的比值) 和伦德奎斯特数 (Lundquist number) $(S = \frac{v_A}{v_d} = \frac{\mu_0 L v_A}{\eta})$ 的关系 $M_A \simeq 1/\sqrt{S}$, 由于空间的等离子体问题中伦德奎斯特数都非常大, 因此这个模型给出的重联率非常小, 难以解释空间等离子体中剧烈的活动现象。为了提高重联率, Petschek 提出了由慢激波作为能量转化机制的模型, 重联率 $M_A \simeq 1/\lg S$, 但是这个模型由于对电阻率分布的要求而存在一定的局限性。对于空间等离子体, 一般都是无碰撞的, 电阻磁场重联的理论并不适用, 因此后来又有研究者发展了无碰撞的重联理论^[10,11], 众多的模拟都指出 Hall 项和反常电阻在磁场重联过程中起着重要作用^[12]。

2 实验室磁场重联研究

迄今为止, 已经有数个实验装置对磁场重联现象进行了模拟研究。按照实验装置的位形, 可以分为以下几种: 线性装置 (LCD 装置^[13]、RSX 装置^[14]、CS-3D 装置^[15]), 球马克装置 (TS-3 装置^[16]、MRX 装置^[17]、SSX 装置^[18]), 环形装置 (VTF 装置^[19])。各装置放电方式和等离子体参数各异, 构造重联位形及产生重联的方法也不相同, 由此决定了每个装置研究的物理内容也不尽相同。

2.1 各个装置的特点及其产生重联的方式

加州大学洛杉矶分校的 LCD (Large Cathode Device) 装置为直线位形, 通过氧化物阴极放电产生直径为 1 m 的等离子体, 等离子体密度为 10^{12} cm^{-3} , 电子温度为 5 eV。在这样的参数下, LCD 装置的伦德奎斯特数值在 10 左右, $d_e \ll l \ll d_i$ (d_i 、 d_e 分别为离子惯性长度和电子惯性长度, l 为重联特征尺度), 离子是不磁化的, 其中的物理过程主要由电子主导, 可以通过电子磁流体动力学 (EMHD)^[20] 来描述。实验通过两个平行放置的电流板施加同向的电流来构造出 X 型的磁场零点^[13], 产生重联所需要的磁场位形, 如图 1 所示。通过对重联电场和等离子体电流的测量, 计算得到的电阻率要比经典的 Spitzer 电阻率大很多, 说明这个过程中反常电阻存在, 重联过程发生。实验过程中观测到了电流片的存在^[21] 以及电子的加热过程^[22]。而后在 LCD 上进行的另一组实验改变了重联位形产生的方式^[23], 通过 Helmholtz 线圈和轴向磁场配合产生场反位形 (Field Reversed Configuration)(如图 1 所示), 加脉冲电流驱动重联产生, 测量电流上升过程的驱动重联过程以及电流消失之后的自由弛豫过程。

MRX (Magnetic Reconnection Experiment) 为球型马克装置, 产生的等离子体密度为 10^{14} cm^{-3} 。TS-3 (Todai Spheromak 3) 装置也为球型马克装置, 等离子体参数和 MRX 基本相同。其中 $\rho_i/l \ll 1$ (ρ_i 为离子回旋半径, l 为装置尺度)、 $S > 100$, 基本符合 MHD 的条件。通过 θ 方向的两个环形导线加平行电流来产生磁场的零点, 改变电流的大小来控制重联的产生。电流上升时磁力线相互挤压的重联过程被称为 “push reconnection”, 电流下降时磁力线向外拉伸的重联过程被称为 “pull reconnection”。MRX 装置较为系统地

研究了碰撞等离子体条件下广义的 Sweet-Parker 模型, 无碰撞磁场重联过程中的 Hall 效应以及电磁涨落在重联过程中的作用, 测量了重联过程中的离子加热和加速过程以及边界条件对重联的影响。MRX 和 SSX 实验中都测量到了垂直于重联截面磁场的存在, 说明了重联过程中 Hall 电流的产生。

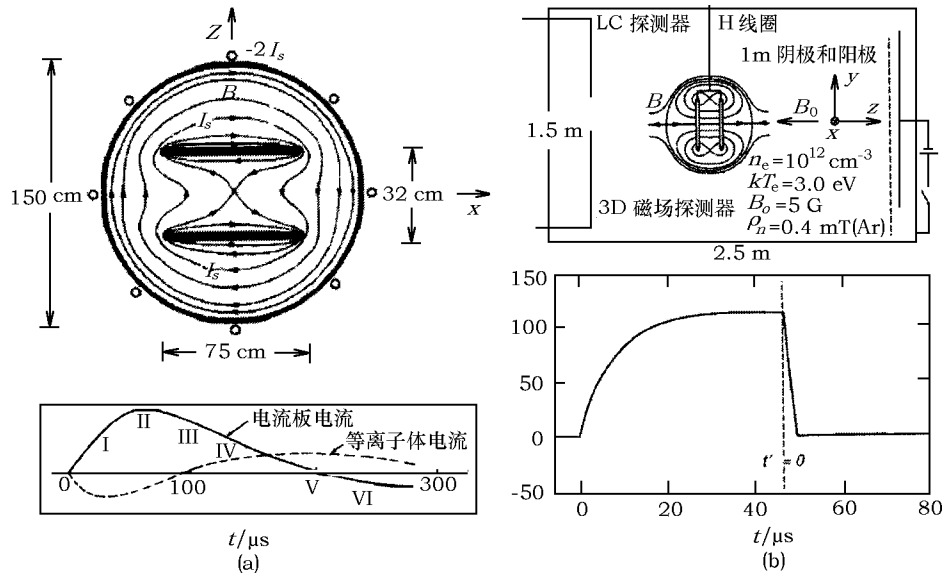


图 1 LCD 实验装置

(a) 平行电流板构造的重联位形以及电流板上所加的电流波形^[13]; (b) Helmholtz 线圈产生的重联位形以及线圈上所加的电流波形^[23]。

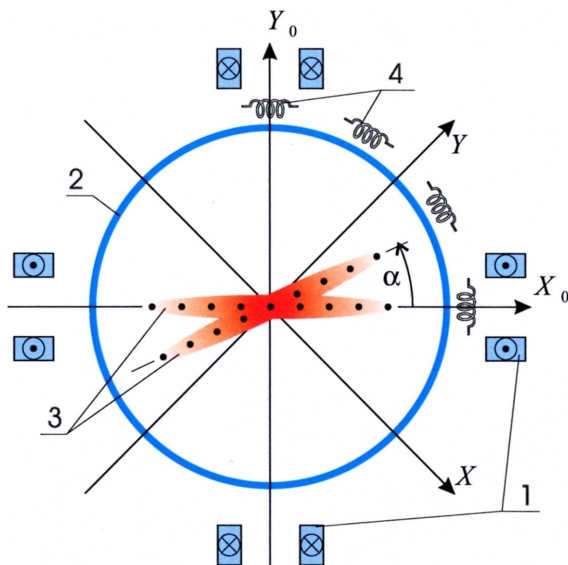
VTF (Versatile Toroidal Facility) 为环形装置^[24], 等离子体通过电子回旋共振加热 (ECRH) 产生, 密度约为 10^{12} cm^{-3} , 电子温度为 10 eV, 这样的参数下发生的重联过程是无碰撞重联。通过装置外部放置的四组线圈通电流产生会切的磁场位形, 并变化线圈电流产生磁场重联。在不同的边界条件下 (磁力线穿越真空壁与否), VTF 装置测量了重联过程中的不同等离子体电流, 分析了这个电流和通行粒子数量的关系。

CS-3D 为角向箍缩装置, 等离子体密度约为 10^{16} cm^{-3} 。通过在真空室外轴向放置的导线加电流产生重联的磁场位形 (如图 2 所示)。放电过程中, 在装置两端加脉冲电压, 产生轴向的等离子体电流片, 实验过程中观测到了 Hall 电流的存在, 并且由于 Hall 电流和导向磁场的共同作用使得电流片发生偏转。

综上所述, 实验室中磁场重联研究的装置参数和研究的物理问题如表 1 所示。

表 1 磁场重联实验室装置的伦德斯特数及其研究的问题

	LCD	MRX	VTF	CS3D	LMP
伦德奎斯特数	10 ~ 100	100 ~ 1000	100 ~ 1000	1 ~ 10	1 ~ 100
主要研究内容	重联效果、反常电阻	Hall 效应、边界条件	边界条件、3D 效应	Hall 效应	电子压力梯度、边界条件

图 2 CS3D 实验装置截面图^[15]

(1) 产生重联磁场的电流导体; (2) 石英管 (真空器壁); (3) 不同方向的电流片; (4) 磁探针。

2.2 实验室磁场重联对重联率的研究

等离子体在磁场中的运动可以通过磁流体方程来描述, 通过双流磁流体方程可以得到归一化的广义欧姆定律:

$$\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} = -\beta_e D_i \nabla \cdot \mathbf{P}_e + \frac{D_i \mathbf{J} \times \mathbf{B}}{n} + D_e^2 \frac{d\mathbf{J}}{dt} + \frac{\mathbf{J}}{S},$$

其中等离子体的特征宏观尺度为 L , 伦德奎斯特数 $S \equiv \omega_A \tau_R$, $\tau_R \equiv 4\pi L^2 / \eta c^2$ 为电阻扩散时间, $\tau_A \equiv 1 / \omega_A \equiv L / V_A$ 为阿尔芬时间, $V_A = B_0 / \sqrt{4\pi n m_i}$ 为阿尔芬速度; $d_\alpha \equiv c / \omega_{p\alpha}$, $D_\alpha \equiv d_\alpha / L$, 分别为惯性长度和归一化的惯性长度 ($\alpha = i, e$ 分别为离子和电子); P_e 为电子压力项。在 $D_\alpha \rightarrow 0, S \rightarrow \infty$ 的近似下, 得到理想磁流体的欧姆定律

$$\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} = 0,$$

此时等离子体与磁力线“冻结”在一起运动。

在强碰撞的等离子体中, 电阻率较大, 重联率可以通过 Sweet-Parker 模型来描述。而在空间中, 等离子体大多是无碰撞的, 电阻率较小, 无法解释观测中发现的快速重联率。为此, 研究者们提出了无碰撞等离子体中的两个快速重联的模型, 一种方法是引入静电或电磁涨落产生的反常电阻率来增加重联率, 另一种方法是考虑 Hall 效应导致的快速重联模型。在实验室等离子体中分别对这两个模型开展了相关研究以理解快速的无碰撞重联过程。

(1) Hall 效应

Sonnerup 指出^[25], 电子和离子在电子惯性长度和离子惯性长度之间的区域内的运动产生分离, 从而形成 Hall 电流, 导致重联区形成了电子扩散区和离子扩散区的双尺度结构, 产

生四极磁场分布。而后 Terasawa [26] 通过数值模拟指出, Hall 效应不仅能够产生磁场的四极分布, 而且能够加速重联过程。

MRX 实验通过变化放电气压, 改变等离子体的密度以及碰撞的平均自由程, 测量了强碰撞和接近无碰撞两种条件下的中性片位形 [27]。在强碰撞的等离子体参数下, 测量得到了长而窄的中性片, 重联过程可以通过 Sweet-Parker 模型来描述, 变化等离子体参数, 使平均碰撞自由程增加, 中性片长度减小, 并且重联率增加。在无碰撞等离子体参数下, 没有导向磁场时, 实验测量到了四极磁场的分布, 确认了 Hall 效应的存在 [27,28], 如图 3 所示。通过对电子出流的测量, MRX 实验测量到了电子扩散区的存在, 并且得到电子扩散区的宽度为 $5.5 \sim 7.5 c/\omega_{pe}$, 与数值模拟得到的宽度接近 [29], 而且在 Polar 卫星的观测中, 也发现了电子扩散区的存在 [30]。

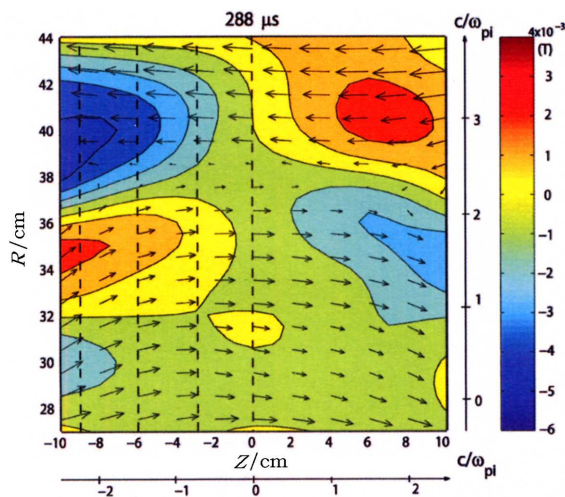


图 3 MRX 中 Hall 效应测量, 颜色的等值线表示轴向的磁场强度 [27]

CS-3D 实验主要研究了由于 Hall 电流和导向磁场的共同作用使得电流片倾斜的现象 [31]。研究发现: 随着轴向磁场的增加, 电流片中心的等离子体密度峰值减小, 电流片厚度增加; 轴向磁场为零时, 电流片对称分布; 轴向磁场增加, 电流片会倾斜偏离 X 轴一定的角度; 轴向磁场反向, 倾斜的方向改变。通过磁探针对轴向磁场测量, 确定在截面上存在 Hall 电流, 而 Hall 电流和轴向磁场的共同作用力使电流片发生倾斜, 如图 4 所示。

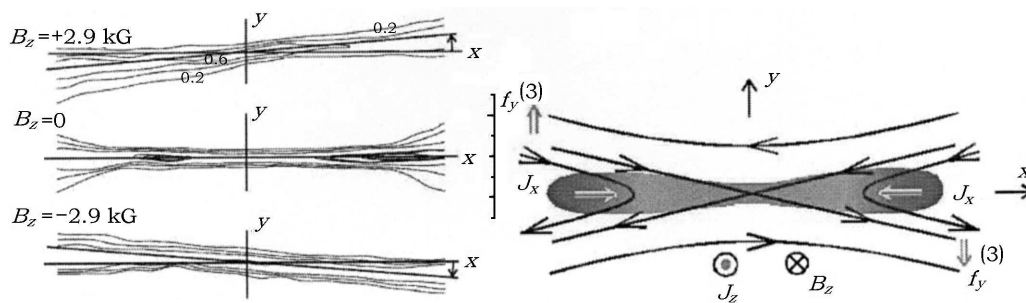


图 4 CS3D 中 Hall 电流对电流片的影响, 不同的导向磁场大小和方向下电流片的形状 [20]

(2) 反常电阻

磁场重联的实验过程中, 经常会伴随着静电或者电磁涨落出现。理论上, 涨落能够对带电粒子散射而产生反常电阻, 加速重联过程。实验室磁场重联研究中, LCD 和 MRX 装置分别观测到了静电涨落^[32]和电磁涨落^[33]。

通过对密度涨落的测量, LCD 装置测量到了频率在离子声湍流附近的静电涨落。强烈的离子声湍流会产生反常的碰撞频率, 计算出的反常碰撞频率要远大于经典的库仑碰撞频率, 相当于由离子声湍流产生了一个反常电阻。由于这个反常电阻的存在而加速了重联过程, 但是实验并没有对这个反常电阻的时空特性给出具体的特征。MRX 在重联过程中测量到了低杂漂移湍流的存在, 这个涨落发生的位置在电流片的边缘, 发生的时间并不是重联最强的时间, 因此这个低杂漂移湍流不能用来解释快速重联现象。其后的实验在重联区附近发现了较强的电磁涨落, 并且证实了这是一支频率在低杂频率附近、右旋极化的哨声波。这个涨落随着重联的发生而增强, 并且发生在电流片中心。它与重联过程紧密关联, 因而这个电磁涨落可能对重联起到了加速作用。最近 Cluster 的观测发现^[34], 哨声波在重联开始前 30 s 出现, 这是一个潜在的能够提供激发重联所需的反常电阻的波动, 这个哨声波在重联产生后大大增强, 频率越来越高, 重联前后波的特性不同表明重联前和重联后的哨声波是由不同机制产生的, 这说明哨声波有可能是激发磁场重联的原因^[35,36]。所以湍流在磁场重联过程中到底是因还是果, 还需要实验的进一步证实。

2.3 重联效果的测量

(1) 离子的加热和加速

在重联过程中, 磁能转化为等离子体的动能和热能, 加速和加热带电粒子, 这种现象在太阳耀斑和磁层等离子体中已经观测到^[37,38]。在实验室中 Ono 等人首先在 TS3 装置上开展了离子的加热和加速研究^[39], 他们对重联过程前后的离子温度演化进行了详细测量, 在重联开始之后离子被加热, 并在一段时间后离子温度达到峰值约 200 eV, 而且同时在实验中测量到离子被加速到阿尔芬速度的量级。MRX 实验也发现了重联过程中的离子加热^[40,41], 离子能量在重联后提高了 10 eV 左右, 离子被加热的位置处于重联的中心。

(2) 电磁辐射测量

太阳等离子体研究中, 电磁辐射是非常普遍的现象。耀斑中的辐射现象表明, 在这类爆发性事件中有相当高能电子产生, 而磁场重联作为重要的耀斑触发机制, 和耀斑中的电子加速及电磁辐射现象有着密切的关系。电子高能成分的增加可能引起等离子体不稳定性, 从而导致涨落的增强, 也有可能产生等离子体频率的静电朗缪尔波, 这个波通过模转换成电磁波, 能够产生电磁辐射, 这个过程可能就是电磁辐射产生的机制。LCD 实验中, Stenzel 等人^[32]测量到了与重联产生的高能电子相关联的电磁辐射。在脉冲电流下降时刻, 通过探针的测量发现了等离子体中电子高能成分的增加, 其后几微秒的时刻测量发现了频率为 6.5 GHz 的辐射峰。这个频率和当地的电子等离子体频率相当, 因此, 这个辐射可能是由于电子等离子体波模转换成为电磁波而产生的。

2.4 边界条件对磁场重联的影响

实验室中的磁场重联过程, 除了受局域的等离子体参数影响外, 也和实验的边界条件密切相关, 这是实验室磁场重联研究和空间中的磁场重联的不同之处。MRX 和 VTF 的实验就

边界条件问题开展了相关研究。

根据磁力线是否穿越真空壁, VTF 实验分为开放和闭合的边界条件进行实验比较^[42]。在开放磁场位形下, 粒子大部分被磁力线捕获, 因此不能有效地形成等离子体电流, 通过罗氏线圈测量得到的电流为 3 A 左右 (和罗氏线圈的误差相差不多)。在闭合磁场位形下, 通行粒子增加, 捕获粒子减小, 实验测量到了有效的等离子体电流, 峰值在 3 kA 左右。

在其他参数完全相同的情况下, MRX 实验改变重联区上下两部分导向磁场的方向, 在两种不同的边界条件下, 实验测量出两种情况下的重联率截然不同, 磁场结构、等离子体流也相应的改变^[43]。这表明整体的边界条件能够改变局域的物理现象, 重联现象和边界条件密切相关。

3 国内磁场重联实验装置的建立

笔者在中国科技大学的线性磁化等离子体装置 (LMP) 上开展了磁场重联实验研究, 如图 5 所示。实验区直径 25 cm, 长 2 m, 外部 10 组线圈通电流产生均匀稳定的轴向磁场, 最大磁场强度 1 000 G。采用螺旋波射频放电或者直流热丝放电, 等离子体密度在 $10^9 \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度在 2 ~ 10 eV 之间, 离子温度约为 0.1 eV, 放电过程中的等离子体参数具有良好的可重复性。实验中通常采用氩气放电, 在 Helicon 放电条件下, 等离子体的密度为 10^{11} cm^{-3} , 电子温度约为 5 eV, 此时电子惯性长度为 2.37 cm, 离子惯性长度为 450 cm。

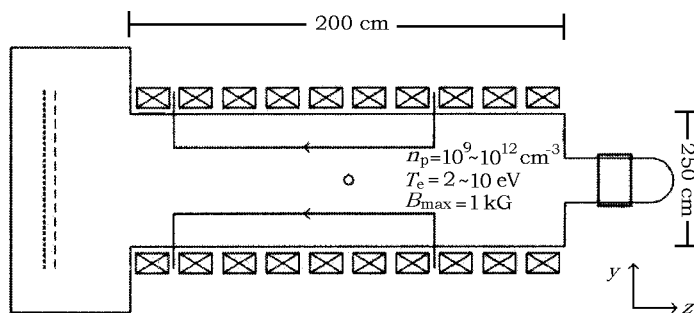


图 5 LMP 实验装置

在实验区中, 沿轴平行放置两块铜导体板, 铜板长 120 cm、宽 10 cm、厚 0.5 cm。在导体板上通同向电流以产生重联所需要的磁场位形。脉冲电流由高压电容对负载放电产生, 每个电流板上电流的最大峰值为 2 500 A, 电流的通断通过 IGBT 开关控制, 通过调节参数可以改变电流波形的沿边特性, 从而改变脉冲电流对等离子体的驱动力。

为了测量发生在横截面上的重联过程, 要求探针能够测量整个二维截面上的等离子体参数和磁场参数, 为此我们设计一个可以二维移动的装置, 能够携带探针在整个截面上精确移动 (移动的精度 < 0.5 mm)。由于放电过程具有良好的重复性, 因此可以分别安装磁探针和静电探针, 通过多次放电逐点测量各点的参数, 计算给出等离子体参数以及磁场参数二维分布的图像。

在 Helicon 放电中, 等离子体的基本参数 (等离子体密度和电子温度) 由静电补偿探针

($l = 4 \text{ mm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$) 给出, 在稳态下, 通过静电探针测量到的离子饱和流 (忽略电子温度的变化, 饱和流的变化近似和密度的变化相当)。磁场的位形通过磁探针测量得到, 磁探针由直径为 0.1 mm 的铜漆包线在直径为 1.5 mm 的陶瓷骨架上绕制 50 圈而成, 两个探针相互垂直地安装在电木骨架上, 然后通过同轴电缆将信号引出。通过磁探针多次逐点测量, 得到截面上磁力线和理论计算的磁力线相符合。磁场重联相关的研究正在继续开展中。

4 总结与展望

自 20 世纪 70 年代开始在箍缩装置上开展重联实验研究以来, 实验室磁场重联研究已经取得了一些突破性的进展, 与空间观测、理论及数值模拟研究相结合, 使得人们对于重联的物理过程有了进一步的深入了解, 比如 Hall 四极场及电子扩散区的实验验证等。但是重联研究中依然存留许多重要物理问题有待解决, 例如重联触发机制是什么? 空间中的重联大多是在三维空间内的爆发重联, 磁能如何在等离子体中先缓慢地全局储存起来, 然后再迅速地局域释放及转换成等离子体动能和热能? 目前三维空间的实验室磁场重联研究逐渐受到重视。早期 LCD 线性装置上的实验结果重新受到重视, 这也是选择线性磁化装置开展重联实验的一个原因, 通过细致测量等离子体及磁场参数的小截面分布如何随着轴向位置变化, 研究局域的重联现象和整体的磁场自组织过程之间的联系。VTF 和 MRX 等环形装置上的实验也已经发现平行电场存在局域结构并会沿环向传播, 这表明以往在环形装置上采用轴对称假定进而研究二维重联过程是不全面的。另外, 目前实验室研究中等离子体参数和重联驱动力的变化范围有限, 并没有针对这些参数开展系统研究, 因此难以确定重联的触发与驱动力及等离子体参数之间的关系。今后的实验研究中如何实现无驱重联, 如何改变有驱重联中驱动力的大小, 如何仅在局域施加驱动力, 均值得尝试。

磁场重联过程常伴随着电子的加速和加热, 对于空间等离子体来说, 电子的加速和加热机制^[44,45]一直是人们关注的问题。但目前在大数磁场重联实验中仅观测到了离子的加热加速, 在实验测量区域并没有观察到显著的电子加速加热。这是否与实验中电子惯性长度非常小, 而实验测量区域大多在离子惯性长度附近有关? 改变等离子体参数, 从而适当增大电子惯性长度, 使得电子动力学信息得以可靠测量是很有益的尝试。另外, 在实验室等离子体参数范围内, 静电探针是获取电子信息的最可行诊断工具, 而进行探针数据解释时需要格外考虑到电子速度的非麦氏分布。

不同的装置在重联过程中测量到了众多的涨落现象, 如低杂涨落、离子声涨落、哨声频率的电磁涨落等, 但是对于涨落在重联过程中所起的具体作用还需要深入研究, 比如涨落与重联触发的因果关系, 涨落对带电粒子的等效散射在磁能转换过程中可能扮演的角色等。在 LCD 的后期实验中测量到了与重联相关的电磁辐射信号, 但缺乏电磁辐射的空间分布, 而且这一结果也没有在其他装置上得到后续验证。

为了使实验室等离子体中的磁场重联过程更接近空间等离子体中观测到的重联过程, 必须使两者的等离子体无量纲参数 (如伦德奎斯特数) 相近。在空间等离子体中伦德奎斯特数一般约为 10^5 , 而目前实验室装置中的 S 数最大仅为 1 000 左右。基于这个原因, MRX 已经将 S 数提高至 10^5 作为装置下一步改造的目标^[46], 这需要进一步提高装置的电子温

度,降低等离子体电阻率。要使电子温度提高,磁场强度及装置长度也要相应增大。对于 S 数较低的实验装置而言,与空间观测、理论及数值模拟紧密结合,有针对性地开展重联中基本物理过程的研究也很有意义。

综上所述,对实验室磁场重联模拟得到的和太阳物理密切相关的几个问题(离子的加速加热、电磁涨落对磁场重联的作用、电磁辐射)进行了简单的回顾和分析。尽管实验室磁场重联模拟也得到了一系列结果,但是仍然还有很多悬而未决的问题,包括电子的加速和加热机制,重联中的辐射现象等。在中国科技大学,一个新的磁场重联实验装置已经建成,并且通过基本的静电探针和磁探针等诊断工具对基本的等离子体参数和磁场参数进行了测量,即将开展磁场重联的深入研究。由于科大装置本身等离子体参数和磁场参数的特点,决定了在装置上能够研究电子扩散区内外的物理机制,笔者希望着重对快速重联的原因、能量转换机制、重联与涨落的关系等物理问题进行详细的研究。

参考文献:

- [1] Tsuneta S. ApJ, 1996, 840: L63
- [2] Russell C T, Elphic R C. GRL, 1979, 6: 33
- [3] Taylor J B. Reviews of Modern Physics, 1986, 28: 243
- [4] Yamada M, Levinton F M, Pomphrey N, et al. POP, 1994, 1: 3269
- [5] Tsuneta S, Acton L, Bruner M, et al. Slo. Phys., 1991, 136: 37
- [6] Phan T D, Hasegawa H, Fujimoto M, et al. GRL, 2006, 33: L09104
- [7] Escoubet C P, Fehringer M, Goldstein M L. Ann. Geophys., 2001, 19: 1197
- [8] Sweet P A. Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics, New York: Cambridge University Press, 1958: 123
- [9] Parker E N. JGR, 1957, 62: 509
- [10] Biskamp D, Schwarz E, Drake J F. POP, 1997, 4: 1002
- [11] Biskamp D. Phys. Plasmas., 1997, 4: 1964
- [12] Birn J. JGR, 2001, 106: 3715
- [13] Stenzel R L, Gekelman W. JGR, 1981, 86: 649
- [14] Furno I, Intrator T, Torbert E, et al. RSI., 2003, 74: 2324
- [15] Frank A G. PPCF, 1999, 41: A687
- [16] Yamada M, Ono Y, Hayakawa A, Katsurai M. PRL, 1990, 65: 721
- [17] Yamada M, Ji Hantao, Hsu S, et al. Phys. Plasmas, 1997, 4: 1936
- [18] Cothran C D, Landreman M, Brown M R. GRL, 2003, 30: 1213
- [19] Egedal J, Fasoli A, Tarkowski D, et al. Phys. Plasmas, 2001, 8: 1935
- [20] Kingsep A S, Chukbar K V, Yan'kov V V. Reviews of Plasma Physics, 1990, 16: 243
- [21] Gekelman W, Stenzel R L. JGR, 1981, 86: 659
- [22] Stenzel R L, Gekelman W, Wild N. JGR, 1982, 87: 111
- [23] Stenzel R L, Urrutia J M, Griskey M, et al. Phys. Plasmas, 2002, 9: 1925
- [24] Egedal J, Fasoli A, Porkolab M, et al. RSI, 2000, 71: 3351
- [25] Sonnerup B U. Solar System Plasma Physics, 1979, 3: 45
- [26] Terasawa T. GRL, 1983, 10: 475
- [27] Yamada M, Ren Yang, Ji Hantao, et al. Phys. Plasmas, 2006, 13: 052119
- [28] Ren Yang, Yamada M, Ji Hantao, et al. Phys. Plasmas, 2008, 15: 082113

- [29] Ren Yang, Yamada M, Ji Hantao, et al. PRL, 2008, 101: 085003
- [30] Mozer F S, Bale S D, Phan T D, et al. PRL, 2003, 91: 245002
- [31] Frank A G, Bogdanov S Y, Markov V S. Phys. Plasmas, 2005, 12: 052316
- [32] Stenzel R L, Griskey M C, Urrutia J M, et al. Phys. Plasmas, 2003, 10: 2810
- [33] Ji Hantao, Terry S, Yamada M, et al. PRL, 2004, 92: 115001
- [34] Wei X H, Cao J B, Zhou G C, et al. JGR, 2007, 112: A10225
- [35] Deng X H, Matsumoto H. Nature, 2001, 410: 557
- [36] Drake J F. Nature, 2001, 410: 525
- [37] Marsch E, Vocks C, Tu C Y. Nonlinear Processes in Geophysics, 2003, 10: 101
- [38] Phan T D, Drake J F, Shay M A, et al. PRL, 2007, 99: 255002
- [39] Ono Y, Yamada M, Akao T. PRL, 1996, 76: 3328
- [40] Hsu S C, Fiksel G, Carter T A, et al. PRL, 2000, 84: 3859
- [41] Hsu S C, Carter T A, Fiksel G, et al. Phys. Plasmas, 2001, 8: 1916
- [42] Egedal J, Fox W, Porkolab M. Phys. Plasmas, 2004, 11: 2844
- [43] Kuritsyn A, Ji Hantao, Gerhardt S P, et al. GRL 2007, 34: L16106
- [44] Fu X R, Lu Q M, Wang S. Phys. Plasmas, 2006, 13: 012309
- [45] Wang R S, Lu Q M, Huang C, et al. JGR, 2010, 115: A01209
- [46] Ji Hantao, Yamada M, Prager S, et al. 51st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, TP8, 2009: 111

Progress in Laboratory Simulation of Magnetic Reconnection

ZHANG Shou-biao¹, XIE Jin-lin¹, HU Guang-hai¹, LI Hong¹, HUANG Guang-li²,
LIU Wan-dong¹

(1. Key Laboratory of Basic Plasma Physics of Chinese Academy of Sciences, Department of Modern Physics University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Magnetic reconnection is an important phenomenon in space and laboratory plasmas, it is considered to be an important mechanism of solar flare and magnetospheric substorm. In the past years, a series of important results have been obtained in the experimental research of magnetic reconnection in laboratory plasma. In this paper, several major experimental devices of magnetic reconnection are introduced, with their different plasma parameters, experimental methods and essential findings. In TS-3 and MRX device, ion acceleration and heating related with magnetic reconnection were observed, but the particle acceleration mechanism is unclarified. Detailed experimental study of electromagnetic fluctuation has been made in MRX, and a positive

correlation between magnetic fluctuations up to the lower-hybrid frequency range and fast reconnection was found. Ion sound turbulence in the current sheet was measured in LCD, which produced an anomalous collision rate and enhanced reconnection rate. In LCD device, microwave radiation was found, which may cause by mode conversion of plasma waves on density gradients. In addition, reconnection experiment is carrying out on the linear magnetized plasma device(LMP) in USTC. Langmuir probes, magnetic probes, energy gridding analyzer, mach probes and emissive probes are fabricated and installed in LMP device. The reconnection magnetic field is generated by two parallel copper boards with current in the same direction.

Key words: plasmas; magnetic fields; turbulence; laboratory

* * * * *

《天文学进展》 2011 年征订启事

《天文学进展》创刊于 1983 年，为中国天文学会学术期刊。被收录为中国科学引文数据库来源期刊。

《天文学进展》主要刊登内容：反映国内外天文学科最新研究进展的评述性文章、高水平的科研论文、学科前沿介绍、科研简讯、专题讲座、学术活动报道。

读者对象：天文学及相关学科的科研人员、高等院校教师、研究生及具有相当天文基础知识的天文爱好者。

《天文学进展》为季刊，每季末 20 日出版，16 开本；每期定价 25 元，全年 100 元。

统一刊号：CN 31-1340/P，邮发代号：4-819，全国各地邮局均可订阅。

欢迎订阅 2011 年《天文学进展》！

《天文学进展》编辑部

2010 年 12 月