



·强激光物理与技术·综述·

强激光驱动线圈靶磁场产生及应用研究进展*

原晓霞¹, 周沧涛¹, 张 华¹, 吴思忠¹, 陈 鹏¹, 滕 建², 张 博², 仲佳勇³

(1. 深圳技术大学 深圳市超强激光与先进材料技术重点实验室 先进材料诊断技术中心 工程物理学院, 深圳 518118; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900; 3. 北京师范大学 天文系, 北京 100875)

摘 要: 介绍了以强激光驱动电容线圈靶的实验方法产生磁场的基本模型及其发展过程。对比了实验室中常用的三种磁场诊断方法, 包含: B-dot、法拉第旋转以及质子背光, 发现前两种方法在实验中仅可以获得距离靶较远处的有限个磁场值, 通过结合模拟工具获得靶处的磁场值与测量点的值跨越几个数量级, 容易产生误差; 质子背光诊断可以在实验中获得全局磁场信息, 能够较好地满足线圈靶磁场诊断的需求。由于线圈靶磁场强且可持续时间长, 在时空分布上具有一定可控性, 因此我们将其应用到了磁重联的研究中, 并成功获得了重联出流等特征。另外线圈靶在带电粒子的约束和磁流体动力学研究等多方面也得到了应用。

关键词: 强激光; 强磁场; 高能量密度物理

中图分类号: O539

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220188

Research progress on generation and application of the magnetic field of intense laser-driven coil target

Yuan Xiaoxia¹, Zhou Cangtao¹, Zhang Hua¹, Wu Sizhong¹, Chen Peng¹, Teng Jian², Zhang Bo², Zhong Jiayong³

(1. Shenzhen Key Laboratory of Ultraintense Laser and Advanced Material Technology, Center for Advanced Material Diagnostic Technology, and College of Engineering Physics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;
2. Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-986-6, Mianyang 621900, China;
3. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: It has been experimentally proved that the intense laser-driven capacitor-coil target can generate a strong magnetic field of several hundred Tesla. The basic model of the magnetic field generated by this experimental method and its development process are introduced. Comparisons are made between three magnetic field diagnostic methods commonly used in laboratory, including: B-dot, Faraday rotation and proton backlight, it is found that the first two methods can only obtain a limited number of magnetic field values far away from the target in the experiment. The values of the magnetic field at the target obtained by the simulation tool and the value of the measurement point cover a span of several orders of magnitude, which is prone to errors; the proton backlight diagnosis can obtain the global magnetic field information in the experiment, which can better meet the needs of the magnetic field diagnosis of the coil target. Because the magnetic field of the coil target is strong and sustainable for a long time, and has a certain controllability in space-time distribution, we applied it to the study of magnetic reconnection, and have successfully obtained the reconnection characteristics, such as outflow. In addition, the coil target has also been applied in many aspects, such as the confinement of charged particles and the study of magnetohydrodynamics, which will provide new ideas for the research of related problems in laboratory.

Key words: intense laser, strong magnetic field, high-energy-density physics

磁场在天文环境中无处不在, 很多天文现象都与之密切相关, 例如: 太阳耀斑^[1]、伽马射线暴^[2]、超新星遗迹^[3]以及吸积盘^[4]等。在过去几十年中, 随着激光技术的发展, 利用高功率激光驱动产生强磁场的研究取得了长足的

* 收稿日期: 2022-06-06; 修订日期: 2022-10-08
联系方式: 原晓霞, yuanxiaoxia@sztu.edu.cn。
通信作者: 周沧涛, zhoucangtao@sztu.edu.cn;
张 华, zhanghua@sztu.edu.cn。

发展。目前实验室主要有两种方法产生磁场：一种是利用强激光驱动平面靶产生一个具有密度和温度梯度的等离子体团，其表面由于比尔曼电池效应会形成环形磁场，这种磁场的产生机制、测量方法以及在高能量密度物理中的应用已经得到了广泛的研究^[5-7]。值得一提的是我国科研人员仲佳勇等人利用这种方法成功模拟了太阳耀斑环顶 X 射线源^[7]，该实验被《自然中国》评价为“实验台上的太阳耀斑”^[8]；另一种是利用高功率激光驱动电容线圈靶，这种靶往往由金属 U 型线圈连接两个金属靶盘组成。近年来该方法被认为是一种产生强磁场的有效方法。自 1986 年 Diodo 等人首次在实验室利用 CO₂ 纳秒激光驱动铜线圈靶获得了 60 T 的磁场^[9]，随后被扩展为亥姆霍兹线圈靶并获得 7 T 的均匀磁场^[10]。2015 年，Santos 等人在 LULI pico2000 激光装置（总能量 500 J，1 ns，激光强度 10¹⁷ W/cm²）上获得了近 800 T 的磁场^[11]。除了利用 ns 激光驱动线圈靶，王为武等人首次利用飞秒激光驱动获得了 20 T 的磁场，并指出现有的大多数超强激光设施可以稳定产生数十 T 的磁场^[12]。由于该方法产生的磁场强且可持续时间长（纳秒激光驱动时可维持十几 ns），时间空间分布具有一定可控性，因此在高能量密度物理的研究中得到了广泛的应用。例如，在实验室天体物理中首先被裴晓星等人应用于研究低 β （热压/磁压）磁重联^[13]，由于这种方法产生的电子密度较低，磁场较强，因此可以产生低 β 等离子体环境；还可以用于导引和约束带电粒子^[14-17]以及应用于等离子体磁流体动力学^[18]的研究中。本文对强激光驱动电容线圈靶磁场产生原理以及磁场的实验室诊断方法进行简要介绍和讨论，并给出几个线圈靶产生磁场在高能量密度物理中的重要应用，为实验室产生及应用这种磁场提供新思路。

1 纳秒激光驱动线圈靶磁场产生

目前实验中应用的线圈靶有多种类型，其中 U 型线圈靶（图 1）是一种应用较为广泛的靶型，这种线圈靶往往由金属 U 型线圈连接两个金属靶盘组成，靶材一般为镍或铜。在文献^[19]中，靶盘的直径为 4000 μm ，两个靶盘的距离为 600 μm ，U 型线圈的直线部分为 600 μm ，弯曲部分的半径为 300 μm ，靶盘厚度以及线圈宽度均约为 100 μm ，前靶盘上有一个直径为 1600 μm 的激光注入孔。实验一般采用一束或多束激光（主激光）穿过前靶盘的激光注入孔作用到后靶盘上进行烧蚀，后靶盘瞬间产生大量的热等离子体，由于电子运动速度远大于离子，出射的热电子首先被前靶盘捕获使其带有负电，同时使得后靶盘带正电。两个靶盘间的电势差驱动金属线圈中产生 kA 量级的强电流，并相应产生强磁场。

在 Fiksel 等人^[20]的简化模型中，两盘（极板）间的电荷平衡方程可描述为

$$C \frac{dU}{dt} = I_0 e^{-\frac{d}{c_s t}} - I_0 e^{\frac{U}{T_e}} + I_c \quad (1)$$

式中： U 为靶盘两端的电压； C 为电容； $I_0 = en_c c_T A_L$ ，为初始产生的电子电流， n_c 为临界密度， c_T 为离子声速， A_L 为激光焦斑尺寸； d 为两个靶盘间距； c_s 为电子声速； T_e 为电子温度； I_c 为线圈电流； $I_0 e^{-\frac{d}{c_s t}}$ 代表带电粒子产生源， $I_0 e^{\frac{U}{T_e}}$ 代表从激光靶点逃逸出来为前靶盘充电的电子。

激光驱动线圈靶后其整体可以看作是一个电阻电感 (RL) 电路模型，外部电路是具有电阻电感的线圈，两个靶盘是电压源的正负极板，公式 (1) 描述了其电压形式。外部电流可由公式 (2) 描述

$$-U(t) = RI_c + L \frac{dI_c}{dt} \quad (2)$$

式中： R 为电阻， L 为电感。

自 Korobkin 等人^[21]在 1979 年提出该方法后的几十年间，线圈靶模型得到了极大的发展，Courtois 等人^[10]在 2005 年提出将线圈靶看作一个 RLC 电路，激光与后靶盘作用产生大量热电子为线圈靶的前后电极板组成的电容器充电，随之增加的电压在线圈中驱动产生上升的电流，直到两靶盘之间的电荷分离场将离子加速到达前靶盘发生短路，线圈电流开始衰减（衰减时间约为 L/R ）。其中电压依赖于热电子的温度和激光功率。

Fiksel 等人^[20]考虑了激光与靶作用过程中电子的产生率对电压的影响，以及在两盘间电荷平衡中加入冷电子

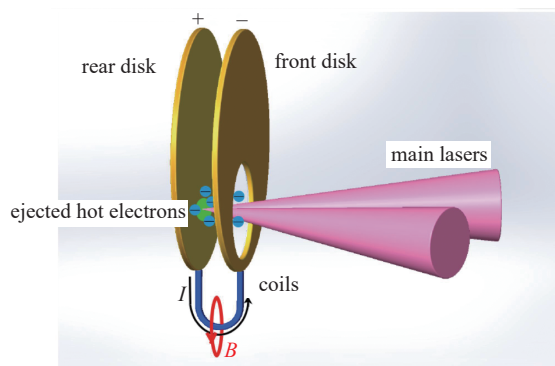


Fig. 1 Schematic diagram of laser-driven capacitor coil target

图 1 激光驱动电容线圈靶示意图

流和离子流,对公式(1)进行拓展后获得了更低的线圈电流,如图2所示,红线代表电子温度呈麦克斯韦分布的线圈电流,蓝线表示10%的热电子 $T_h=10\text{ keV}$,90%的冷电子 $T_c=1\text{ keV}$ 的双温分布的线圈电流。对比两条线发现热电子数目降低了90%,电流仅减少了30%,可见热电子对于线圈电流的产生占了主导地位。Goyon等人^[22]对模型做了进一步的修正,由于两个极板间的等离子体在几得拜长度上屏蔽了电场导致了电容的增加,在激光结束后较大的电容不会引起快速的震荡,因此激光关闭后线圈电流仍有一定的上升。Tikhonchuk等人^[23]提出了一个自洽的模型描述激光驱动线圈靶产生强电流,讨论了三个主要影响电流的因素:空间电荷平衡、极板间等离子体的磁化以及外部线圈的欧姆加热。该模型中的电势与Goyon模型中的类似,但是要求的板间等离子体的密度更低,而且等离子体无需充满整个极板空间,只需要在电流传输的区域存在。同时考虑了欧姆加热对电阻以及电流的趋肤深度的影响。模型与激光强度约为 $1\times 10^{15}\text{ W/cm}^2$ 的实验进行了对比,发现电流电压以及电阻均符合较好。Williams等人^[24]的模型重点考察了激光强度在 $1\times 10^5\sim 1\times 10^{14}\text{ W/cm}^2$ 的情况,低激光强度下可以避免强电磁干扰,因此可以直接测量两极板间的电压以及电流,并获得了激光强度与磁场之间的关系。近期,Morita等人^[25]利用长脉冲(10 ns)高功率(0.5 TW)激光驱动U型金属靶获得了磁场的拓扑结构,并与模型对比提出开始时由于趋肤效应线圈电阻很高,而随着电流在线圈径向扩散电阻升高,当线圈出现融化后由于电流扩散和欧姆加热电阻缓慢降低,因此导致线圈电流也持续上升,直到激光脉冲结束。王为武等人^[26]仔细分析了在强电流条件下线圈电阻的测量方法,并指出导线电阻值比常温直流电阻高出3个量级属于合理范围。由于不同的激光条件以及产生的不同等离子体条件对该模型过程有着重要的影响,且在已有的模型中几乎未考虑变量的时间依赖,因此在未来仍存在较大的优化空间进而获得一个更高效完备的模型。

2 磁场诊断方法

激光驱动电容线圈靶实验中常用的三种磁场诊断方法分别是: B-dot、法拉第旋转以及质子背光,各个诊断的实验排布如图3所示^[11]。

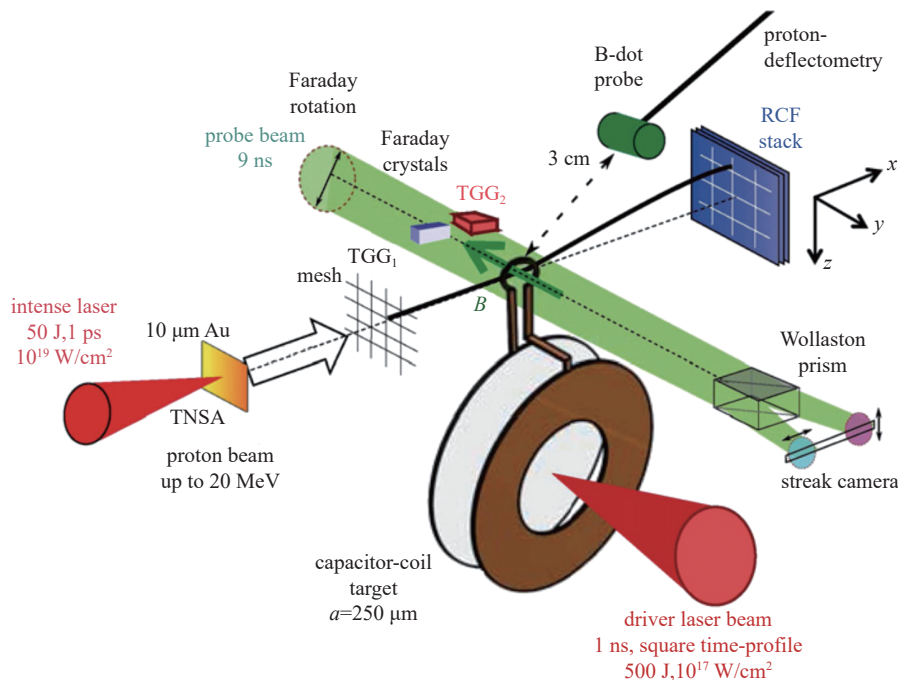


Fig. 3 Schematic diagram of the magnetic field diagnosis arrangement of the laser-driven capacitor coil target experiment^[11]

图3 激光驱动电容线圈靶实验磁场诊断排布示意图^[11]

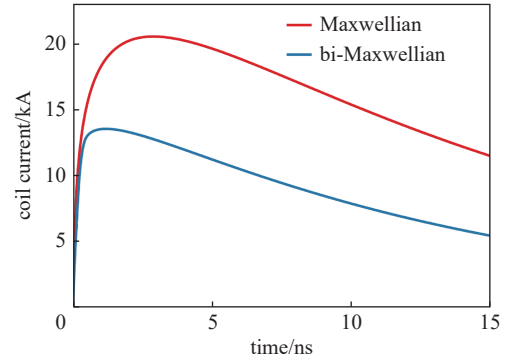


Fig. 2 Coil current as a function of time for Maxwell-distributed electron temperature (red line) and bi-temperature distribution electron temperature (blue line)^[20]

图2 麦克斯韦分布的电子温度(红线)和双温分布的电子温度(蓝线)下随时间变化的线圈电流^[20]

2.1 B-dot 方法

B-dot 方法是实验室测量磁场较为常用的方法之一,其基本原理基于法拉第定律。如图 4 所示, B-dot 由电感线圈串联电阻组成,当线圈感受到其周围环境快速变化的磁场 dB/dt 时会感应出变化的电压信号 $U(t)$, 该信号在电阻 R 两端可获得。在激光驱动线圈靶实验中,待测量磁场信号由靶线圈中的强电流 $I(t)$ 所产生^[27]。在实际测量中使用的 B-dot 一般由两个相互缠绕并且极性相反的电感线圈组成,如此可以将测量到的两个电压相减获得不含噪声的电压信号。

这种测量方法获得的测量值个数取决于 B-dot 的个数,因此实验中难以对全空间磁场进行测量。通常对这类数据的分析往往要结合如 RADIA 真空电磁仿真程序包。在程序中通过预设与实验靶线圈相同的参数及电流获得全空间的磁场分布,通过多次变化电流值进行模拟将实验获得磁场位置的值与模拟中相同位置的值进行匹配,从而确定线圈电流的大小,由此也获得全空间的磁场分布^[28]。为了免受激光等离子体相互作用对探针的影响,探针往往被置于距离靶线圈几 cm 处的位置,而电容线圈靶产生的磁场随空间距离衰减,因此 B-dot 探测到的磁场信号较弱。通过这种电磁模拟程序从实验测量点推演到线圈中心的磁场值往往跨越几个数量级,因此最终获得的磁场结果可能会产生较大的误差。

2.2 法拉第旋转法

法拉第旋转法顾名思义是基于法拉第效应的一种测量方法,基本原理是当一束偏振光经过处于磁场的磁光介质时偏振方向会发生旋转,旋转角度与沿光路方向分布的磁场成正比,这种现象也叫做磁光效应。实验中法拉第旋转的基本设置如图 3 所示,一束偏振探针激光穿过线圈磁场包围的晶体法拉第(TGG)晶体,激光偏振方向发生改变,继而通过渥拉斯顿棱镜分为平行和垂直两个方向偏振的光,最终被条纹相机捕获并记录。图 5(a)为没有磁场时的条纹相机结果,可见探针光没有垂直分量,图 5(b)中垂直方向的偏振光的出现意味偏振方向发生了旋转^[5]。最终通过计算垂直和水平方向的光强比获得旋转角度 θ ,再由 $\theta = V \times B \times D$ 获得晶体处的磁场大小, D 为介质中光路的长度, V 为维尔德常数。与 B-dot 方法类似,这种诊断方法中法拉第晶体需要放置于距离线圈较远处以避免杂散光的损伤,因此同样将较远一点处的磁场通过结合模拟工具推演整个空间的磁场分布也可能出现较大误差。

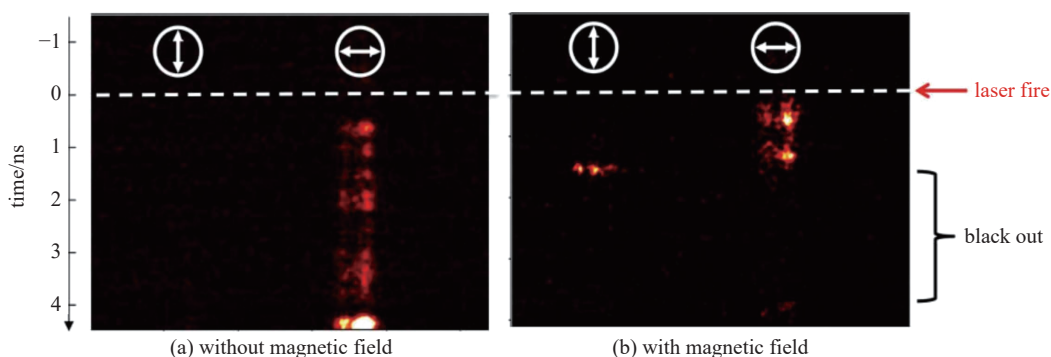


Fig. 5 Fringe images of the horizontal and vertical polarization components of the probe light without magnetic field and with magnetic field^[29]

图 5 无磁场和有磁场情况下探针光的水平和垂直偏振分量的条纹图像^[29]

2.3 质子背光

质子背光是基于质子在磁场中运动受到洛伦兹力而发生路径变化的成像技术,通过分析质子特定的分布特点可以获得电磁场的大小以及分布。这种诊断一般包含质子源以及成像板两个主要部分。质子源通常分为两种:一种是使用 D^3He 靶丸内爆产生单能质子,具体为采用 kJ 能量的激光(约 1 ns)驱动一个内部充满了 D^3He 的 SiO_2 靶丸,当玻璃外壳爆裂向内压缩填充气体使其温度升高至 keV 量级,从而产生 14.63 MeV 和 3.02 MeV 的单能质子。Li 等人在 OMEGA 激光装置上利用这种诊断方法获得由比尔曼电池效应产生磁场发生重联的演化过程^[6]。但是一

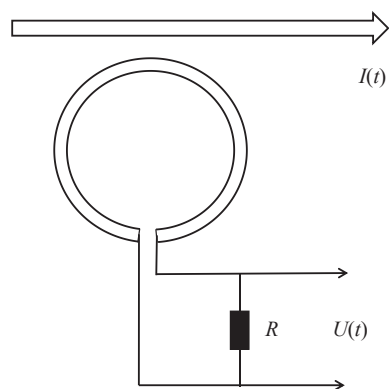


Fig. 4 Schematic diagram of the principle of B-dot magnetic probe measuring magnetic field

图 4 B-dot 测量磁场原理示意图

一般电容线圈靶产生的电磁场演化也在 ns 量级,因此同样量级时间分辨的质子束难以满足诊断需求;另外一种质子源是由靶后壳层加速产生,具体过程一般是利用一束 ps 激光轰击一个金属平面靶,大量的电子脱离靶在靶后形成一个强电场,质子在这个电场的加速下逃离靶面形成具有带宽的质子束,其能量峰值可以达到 30~50 MeV。

文献 [11] 在靶后放置一个放射性变色膜 (RCF) 堆栈用来接收质子,堆栈通常由多片 RCF 片以及 Al 膜组成。由于不同能量质子布拉格峰出现的位置不同,因此质子束在穿越堆栈时不同能量的质子会沉积在不同的 RCF 片上,最终每一片 RCF 对应一个特定的质子能量。文献 [11] 通过在不同发次中改变 ps 激光相对于主激光(用于驱动线圈靶)的延迟时间从而获得磁场时序演化过程。Santos 等人在实验中通过这种方法对线圈靶产生的近 kT 磁场进行诊断,具体诊断排布见图 3^[11]。图 6(a) 是实验获得的相对于主激光延迟 0.35 ns 的质子背光结果,对应的质子能量约为 13 MeV,可以看到当质子束从线圈靶侧面入射,由于洛伦兹力的作用质子被排开落在 RCF 接收板上形成特殊的空泡结构。在模拟中使用与实验相同的设置,包括靶型、质子源、电流分布以及 RCF 等,通过多次改变线圈电流大小获得与实验结构相似的质子结构,如图 6(b) 所示,由此获得了实验中线圈电流的值,该实验线圈中心的磁场为 95 T。相比于前两种方法实验中只能测量空间某几个点处的磁场,质子背光方法可以获得整个空间的磁场信息,并且 ps 量级的时间分辨也满足了线圈靶磁场的诊断需求。

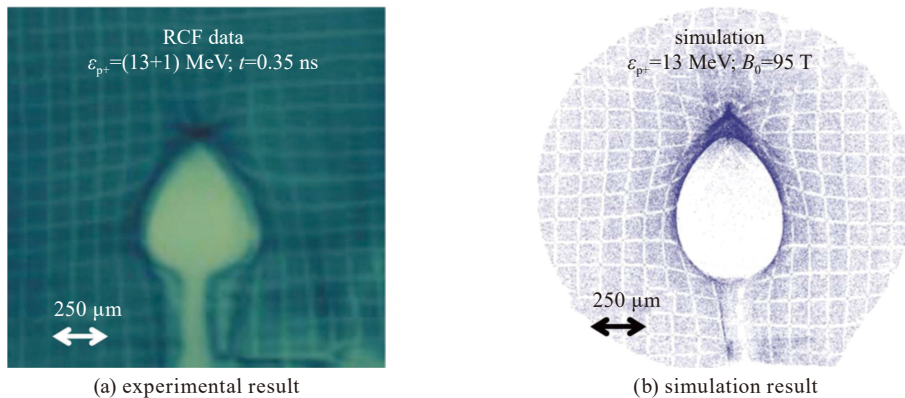


Fig. 6 Experimental and simulation results of proton backlighting^[11]

图 6 实验和模拟给出的质子背光结果^[11]

3 激光驱动电容线圈靶的实验应用

激光驱动电容线圈靶已被证明可以产生几百 T 且持续数 ns 的磁场,这为高能量密度物理的研究提供了基础。目前已被应用于实验室天体物理的磁重联、带电粒子约束以及磁流体动力学等多方面。

3.1 低 β 磁重联研究

磁重联是方向相反的磁力线互相靠近并挤压形成耗散区,并在耗散区发生磁能向等离子体能量的转化以及磁场拓扑结构的改变,是等离子体物理中能量转化的一个基本过程^[30]。磁重联过程广泛的存在于天体物理,例如:太阳耀斑、恒星形成、太阳风与地球磁层的耦合、吸积盘物理以及伽玛爆等现象中。研究表明大多数的天文环境属于低 β 等离子体范畴^[31],因此对低 β 磁重联的研究对于理解天体物理现象具有重要意义。

我们在神光 II 和星光 III 激光装置上进行激光驱动电容线圈靶低 β 磁重联的实验研究^[19],实验设置如图 7 所示。神光 II (星光 III) 实验采用波长 351 nm (527 nm)、总能量约 529 J (约 117 J)、脉宽 1 ns (1 ns)、强度为 7.7×10^{14} W/cm² (1.4×10^{14} W/cm²) 的激光驱动线圈靶。两个平行 U 型线圈同步产生相同的电流,其产生的磁场在线圈中间方向相反,获得磁重联发生所需的磁场拓扑结构。实验采用阴影成像观测到的重联点随时间的上移,与太阳耀斑环顶结构相似,在质子背光中获得了由于 X 点周围的弱磁场导致的质子堆积结构。通过分析干涉成像获得了电子密度 $n_e = 10^{18}$ cm⁻³,利用 B-dot 获得了两线圈中间的磁场 $B = 38.5$ T,温度 $T_e = 100$ eV,可知 $\beta = n_e k T_e / B^2 = 0.026$, k 为玻耳兹曼常数。该实验表明了在天体物理学中的潜在应用可能,例如研究太阳耀斑和磁尾的重联。此外,裴晓星等人^[13]在实验的阴影成像中观测到了由重联导致的等离子体出流的堆积以及利用法拉第旋转测量到了重联电场信号。Chien 等人^[32]针对质子背光中由于电流片性质导致的特殊结构进行了研究,给出了两种可能导致特殊结构形成的原因,包括重联产生的平行电场以及电流片电流产生的磁场。在实验室天体物理中,过去往往采用激光驱动平面靶由比尔曼电池效应产生的磁场进行磁重联的研究,但是这种方法产生的是高 β 且流驱动的磁重联过程,与天文

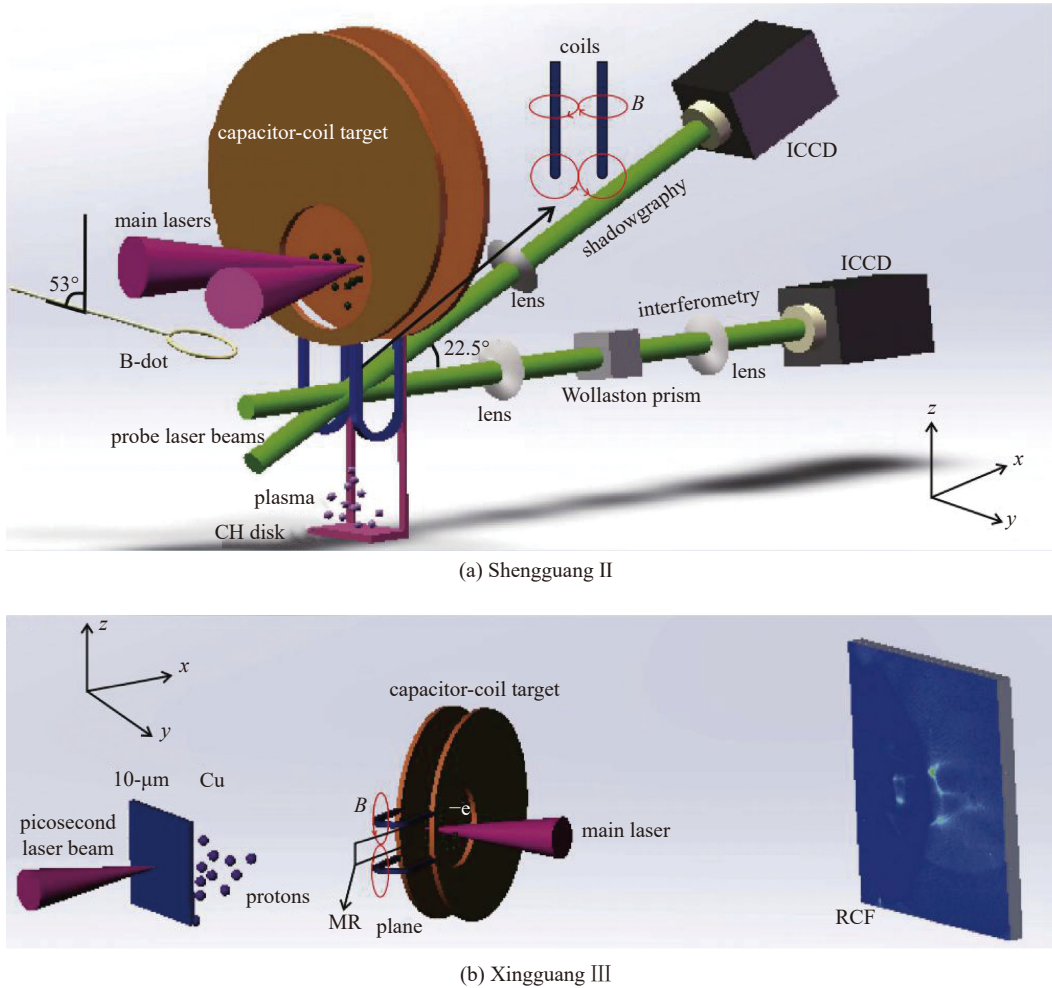


Fig. 7 Experiment setup of the laser-driven capacitor-coil target on laser facilities^[19]

图 7 激光设备上激光驱动线圈靶磁重联实验设置^[19]

中的实际过程有差别。而激光驱动线圈靶可以进行与实际更接近的磁驱动低 β 的磁重联研究,为实验室天体物理开辟了新方法。

3.2 带电粒子约束

强激光驱动固体密度靶可以加速产生相对论电子束,该过程可将大量激光能量传输进入靶内,为高能粒子及辐射源的产生,驱动物质达到与行星和星际物质相同的极高温状态,以及实现高增益热核聚变提供了基础。快点火是聚变点火的一种可能技术途径,基本过程是利用一束脉宽约 10 ps、10 kJ 能量的 MeV 电子束驱动点燃一个高度压缩的氘氚靶丸^[15]。因此产生和传输大量高能电子是关键之一,但是研究发现利用激光驱动固体密度靶产生的相对论电子束具有较大的发散度,导致激光能量的耦合度降低。因此如何控制电子束发散角将其约束在一个小的传输半径上实现更高的激光能量耦合率成为研究热点。研究发现自生磁场对电子束的约束效果较差,并且这类靶型比较复杂,应用存在限制^[16]。蔡洪波等人^[15]的 2D3V 粒子模拟研究结果指出在无外加磁场时,激光能量与高能电子的转化率仅 7%,当施加 3 MG 以上的磁场可以使转化率提高到 20%。Grandvaux 等人^[16]在实验室对外加磁场对相对论电子束的影响进行了研究,图 8 为该研究实验装置示意图。

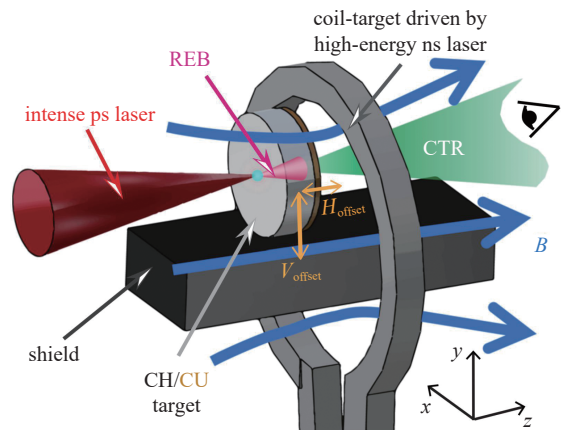


Fig. 8 Experimental configuration for relativistic electron beam transport with imposed B-field^[16]

图 8 外加磁场下相对论电子束的传输实验设置示意图^[16]

该实验在 LULI pico 2000 激光装置上进行, 采用一束脉宽 1 ns、能量 500 J 左右、强度 $1.4 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 的激光驱动一个镍线圈靶, 产生一个持续数 ns 的几百 T 的磁场作为外加磁场。相对 ns 激光之后一定时间驱动一束短脉冲激光(脉宽 1 ps, 能量约 48 J, 强度 $2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$) 在固体靶上产生相对论电子束。由于线圈靶磁场持续时间够长, 在相对论电子束产生前将固体靶完全磁化。研究表明激光驱动线圈靶产生的磁场对激光驱动固体密度靶产生的相对论电子束进行导引可以实现电子束的聚拢, 并在模拟中发现靶后能量密度通量提高了 5 倍。此外, 线圈靶产生的 kT 磁场有效抑制热电子在皮秒激光驱动的平面靶中横向传输, 增强加速质子的电场, 从而实现质子束的准直以及提高加速质子的最大能量^[17]。

3.3 磁流体动力学 (MHD) 研究

外加磁场下的高能量密度等离子体(HEDP)的磁流体动力学基础物理的研究与天文、太阳物理以及惯性约束核聚变有着密切关系。在天体物理研究中, 使用三维磁流体动力学模拟研究了磁瑞利-泰勒不稳定性的非线性演化, 发现外部磁场的恢复力会降低流体边界处的剪切流, 从而导致流体混合减少^[33]。尽管在这个研究领域有几项数值研究, 但由于缺乏强磁场源很难进行基础实验研究。而激光驱动电容线圈靶方案的提出为这类问题提供了实验研究的可能性。

Matsuo 等人^[18]在 GEKKO-XII 激光器上进行实验, 在两个线圈中间用激光束照射厚 $25 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯 (C_8H_8) 箔(主靶), 在主靶上下两端分别放置 $50 \mu\text{m}$ 钽板以防止主靶受到线圈靶盘处产生的 X 射线影响。驱动线圈靶的激光束早于驱动主靶的激光束 1.5 ns 发射, 为线圈产生的外部磁场扩散到主靶处提供足够的时间。图 9 为两个线圈靶产生的磁场分别平行和垂直主靶等离子体的运动方向, 由图可见, 激光入射方向与主靶产生的等离子体运动方向平行。此实验证明即使对于高 β 的等离子体, 200~300 T 的外部磁场也会显著影响 HEDP 的流体动力学和不稳定性增长。

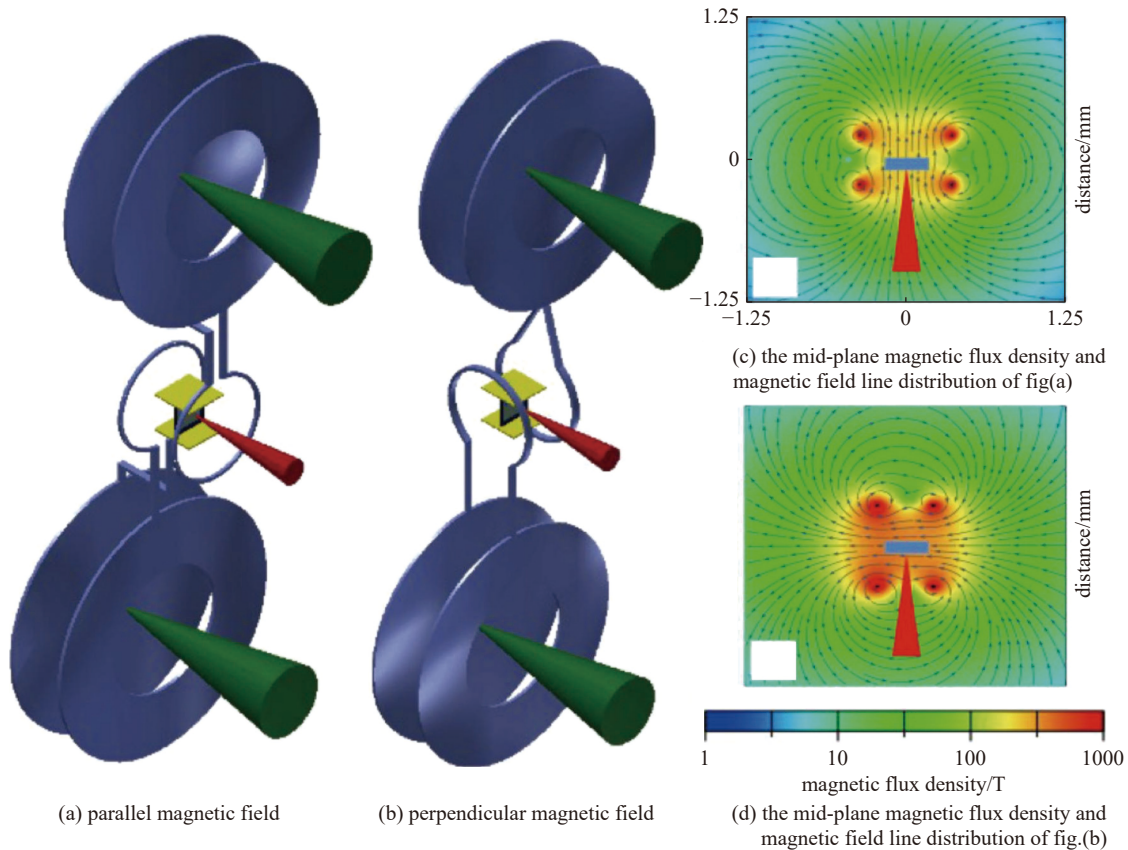


Fig. 9 Schematic diagram of the experiment to study the hydrodynamics of HEDP in an external magnetic field

图 9 研究 HEDP 在外部磁场中的流体动力学的实验示意图^[18]

4 讨论和展望

强磁场环境的构建对高能密度物理有着重要意义。目前激光驱动产生强磁场的方法主要包括驱动平面靶由比尔曼电池效应产生位于等离子体团表面的磁场, 以及驱动电容线圈靶产生的磁场。前者由于与等离子体耦合

在一起仅适用于部分高能量密度物理的研究,而后者由电流产生磁场,可以被作为外加磁场源使用,为高能量密度物理的研究提供了更多的可能性。除了以上介绍的磁重联、带电粒子约束以及 MHD 的研究,线圈靶还被应用于增强由靶后壳层机制产生的质子加速^[34],以及经过优化变为螺线圈与激光尾场加速器耦合产生能量范围为 5~250 keV 的超亮准单色 X 射线,并优化自由电子激光参数和增益长度^[35]。另外电子加速是磁重联中一直以来的一个热点问题,在太阳以及地球磁层周围均发现了呈幂律谱分布的非热电子。但是由于过去高 β 磁重联实验即激光驱动平面靶产生两个带有环形磁场的等离子体泡之间的重联,不利于非热电子的产生,而其他专门研究磁重联实验的装置如 Magnetic reconnection experiment (MRX)^[30] 等由于特征尺寸太大以及对粒子诊断装置的不友好也难以诊断非热电子。利用双线圈靶进行的低 β 磁重联实验不仅有利于非热电子的产生,而且也满足粒子诊断的要求,这将使磁重联中电子加速的研究成为可能。

随着激光技术的发展科研人员可以在实验室创造极端的等离子体条件,通过标度变换法将实验室条件对标到天文环境,为天体物理的发展创造了前所未有的机会,这也是实验室天体物理这一学科被催生和发展的重要背景^[36]。激光驱动线圈靶产生的磁场强度大、存续时间较长以及具有一定的可控性使其应用广泛,未来可根据具体实验目标灵活设计,为实验室天体物理以及高能量密度物理的研究扩大了范围。期待未来利用我国的星光和神光系列高功率激光器展开更多的新研究,获得更多的新成果。

5 结 论

本文介绍了激光驱动线圈靶产生强磁场的原理及其模型的发展历程,并对比讨论了三种实验室中常用的诊断磁场的方法。可以看出 B-dot 和法拉第旋转方法均由距离靶较远处的实验测量磁场值结合模拟工具推演整个空间的磁场分布,此过程磁场跨越几个数量级可能出现较大误差。而质子背光诊断可以获取全局磁场分布,对于线圈靶磁场的诊断具有一定优势。激光驱动线圈靶产生的磁场强且具有持续时间长、在时空分布上具有一定可控性的特点,因此在高能量密度物理中得到了广泛的应用,同时该方法也为实验室相关问题的研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] Shibata K, Magara T. Solar flares: magnetohydrodynamic processes[J]. *Living Rev Sol Phys*, 2011, 8: 6.
- [2] Yuan Feng, Zhang Bing. Episodic jets as the central engine of gamma-ray bursts[J]. *Astrophys J*, 2012, 757: 56.
- [3] Meinecke J, Doyle H W, Miniati F, et al. Turbulent amplification of magnetic fields in laboratory laser-produced shock waves[J]. *Nat Phys*, 2014, 10(7): 520-524.
- [4] Balbus S A, Hawley J F. A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I-Linear analysis. II-Nonlinear evolution[J]. *Astrophys J*, 1991, 376: 214-233.
- [5] Nilson P M, Willingale L, Kaluza M C, et al. Magnetic reconnection and plasma dynamics in two-beam laser-solid interactions[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 255001.
- [6] Li C K, Séguin F H, Frenje J A, et al. Observation of megagauss-field topology changes due to magnetic reconnection in laser-produced plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 055001.
- [7] Zhong Jiayong, Li Yutong, Wang Xiaogang, et al. Modelling loop-top X-ray source and reconnection outflows in solar flares with intense lasers[J]. *Nat Phys*, 2010, 6(12): 984-987.
- [8] <http://www.naturechina.com.cn/nchina/2010/101201/full/nchina.2010.136.html>.
- [9] Daido H, Miki F, Mima K, et al. Generation of a strong magnetic field by an intense CO₂ laser pulse[J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 56(8): 846-849.
- [10] Courtois C, Ash A D, Chambers D M, et al. Creation of a uniform high magnetic-field strength environment for laser-driven experiments[J]. *J Appl Phys*, 2005, 98: 054913.
- [11] Santos J J, Bailly-Grandvaux M, Giuffrida L, et al. Laser-driven platform for generation and characterization of strong quasi-static magnetic fields[J]. *New J Phys*, 2015, 17: 083051.
- [12] Wang Weiwu, Cai Hongbo, Teng Jian, et al. Efficient production of strong magnetic fields from ultraintense ultrashort laser pulse with capacitor-coil target[J]. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 083111.
- [13] Pei Xiaoxing, Zhong Jiayong, Sakawa Y, et al. Magnetic reconnection driven by Gekko XII lasers with a Helmholtz capacitor-coil target[J]. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 032125.
- [14] Zhang Jie, Wang Weimin, Yang Xiaohu, et al. Double-cone ignition scheme for inertial confinement fusion[J]. *Philos Trans Roy Soc A: Math, Phys Eng Sci*, 2020, 378: 20200015.
- [15] Cai Hongbo, Zhu Shaoping, He Xiantu. Effects of the imposed magnetic field on the production and transport of relativistic electron beams[J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 072701.
- [16] Bailly-Grandvaux M, Santos J J, Bellei C, et al. Guiding of relativistic electron beams in dense matter by laser-driven magnetostatic fields[J]. *Nat Commun*,

- 2018, 9: 102.
- [17] Arefiev A, Toncian T, Fiksel G. Enhanced proton acceleration in an applied longitudinal magnetic field[J]. *New J Phys*, 2016, 18: 105011.
- [18] Matsuo K, Nagatomo H, Zhang Zhe, et al. Magnetohydrodynamics of laser-produced high-energy-density plasma in a strong external magnetic field[J]. *Phys Rev E*, 2017, 95: 053204.
- [19] Yuan Xiaoxia, Zhong Jiayong, Zhang Zhe, et al. Low- β magnetic reconnection driven by the intense lasers with a double-turn capacitor-coil[J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2018, 60: 065009.
- [20] Fiksel G, Fox W, Gao Lan, et al. A simple model for estimating a magnetic field in laser-driven coils[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 134103.
- [21] Korobkin V V, Motylev S L. On a possibility of using laser radiation for generation of strong magnetic fields[J]. *Sov Tech Phys Lett*, 1979, 5: 474.
- [22] Goyon C, Pollock B B, Turnbull D P, et al. Ultrafast probing of magnetic field growth inside a laser-driven solenoid[J]. *Phys Rev E*, 2017, 95: 033208.
- [23] Tikhonchuk V T, Bailly-Grandvaux M, Santos J J, et al. Quasistationary magnetic field generation with a laser-driven capacitor-coil assembly[J]. *Phys Rev E*, 2017, 96: 023202.
- [24] Williams G J, Patankar S, Mariscal D A, et al. Laser intensity scaling of the magnetic field from a laser-driven coil target[J]. *J Appl Phys*, 2020, 127: 083302.
- [25] Morita H, Pollock B B, Goyon C S, et al. Dynamics of laser-generated magnetic fields using long laser pulses[J]. *Phys Rev E*, 2021, 103: 033201.
- [26] 王为武, 单连强, 田超, 等. 一种脉冲强电流条件下导线电阻测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 082001. (Wang Weiwu, Shan Lianqiang, Tian Chao, et al. A method for estimating coil resistance with pulsed strong electric current[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 082001)
- [27] 谭榕容, 冉汉政, 程刚. 基于B-Dot的kA级短脉冲电流测量方法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(6): 990-994,999. (Tan Rongrong, Ran Hanzheng, Cheng Gang. Measurement of kA-level short pulse current based on B-Dot[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(6): 990-994,999)
- [28] Zhu Baojun, Li Yutong, Yuan Dawei, et al. Strong magnetic fields generated with a simple open-ended coil irradiated by high power laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 261903.
- [29] Fujioka S, Zhang Zhe, Ishihara K, et al. KiloTesla magnetic field due to a capacitor-coil target driven by high power laser[J]. *Sci Rep*, 2013, 3: 1170.
- [30] Yamada M, Ji Hantao, Hsu S, et al. Study of driven magnetic reconnection in a laboratory plasma[J]. *Phys Plasmas*, 1997, 4(5): 1936-1944.
- [31] Ji Hantao, Daughton W. Phase diagram for magnetic reconnection in heliophysical, astrophysical, and laboratory plasmas[J]. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 111207.
- [32] Chien A, Gao Lan, Ji Hantao, et al. Study of a magnetically driven reconnection platform using ultrafast proton radiography[J]. *Phys Plasmas*, 2019, 26: 062113.
- [33] Stone J M, Gardiner T. Nonlinear evolution of the magnetohydrodynamic Rayleigh-Taylor instability[J]. *Phys Fluids*, 2007, 19: 094104.
- [34] Morita H, Arefiev A, Toncian T, et al. Application of laser-driven capacitor-coil to target normal sheath acceleration[J]. *High Energy Density Phys*, 2020, 37: 100874.
- [35] Tan Junhao, Li Yifei, Zhu Baojun, et al. Short-period high-strength helical undulator by laser-driven bifilar capacitor coil[J]. *Opt Express*, 2019, 27(21): 29676-29684.
- [36] 张杰, 赵刚. 实验室天体物理学简介[J]. *物理*, 2000, 29(7): 393-396. (Zhang Jie, Zhao Gang. Introduction to laboratory astrophysics[J]. *Physics*, 2000, 29(7): 393-396)