

强激光实验室天体物理研究进展*

李彦霏¹ 李玉同^{1,2,†}

(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 上海交通大学 IFSA 协同创新中心 上海 200240)

2015-10-06 收到

† email: ytli@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160202

Recent progress of high-power laser driven laboratory astrophysics

LI Yan-Fei¹ LI Yu-Tong^{1,2,†}

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

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

摘要 高功率激光器技术的发展使得人们可以在实验室中创造出与天体环境类似的极端物理条件, 这为科学家提供了针对某些重要天体物理过程进行实验室研究的可能性, 由此催生了一个新的物理学前沿领域——实验室天体物理学。文章将简单介绍该领域中几个热点问题的新进展, 包括实验室和天体流体过程的定标关系、无碰撞冲击波、磁重联、喷流、超强磁场的产生等, 最后对实验室天体物理学的发展方向作了展望。

关键词 实验室天体物理, 高能量密度物理, 高功率激光与物质相互作用

Abstract With the development of high-power lasers, extreme physical conditions similar to those in astronomical environments can be created in the laboratory. This makes it possible for scientists to experiment on various important astrophysical processes, which may lead to a new frontier of physics — laboratory astrophysics. This paper will briefly present the recent progress of several research topics in this field, including the scaling law of the hydrodynamical processes between the laboratory and space, collisionless shocks, magnetic reconnection, astrophysical jets, the generation of ultra-strong magnetic fields, and so forth. Finally, we shall review the prospects for the development of laboratory astrophysics.

Keywords laboratory astrophysics, high energy density physics, high-power laser interactions with plasmas

1 引言

高能量密度物理主要研究在压强大于 1 Mbar 的极端条件下的物理性质和过程。在高能量密度物理系统中, 单位体积内聚集的能量远高于分子和原子之间的内能, 物质成为电离介质, 即等离

子体状态。宇宙中许多天体和天文现象, 如太阳、巨行星、超新星、 γ 射线暴等, 都属于高能量密度物理范畴。实验室天体物理学是近年发展起来的物理前沿, 其核心是利用高功率激光、Z-箍缩等实验室手段, 在实验室中研究高能量密度天体物理的过程、机制等。

1960 年, 梅曼发明了第一台激光器。此后数十年里, 激光技术得到了日新月异的发展。激光

* 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: 1135012, 11375262)资助项目

在医学、生产、航空航天、科研等方方面面已经得到了广泛应用。在高能量密度物理领域，高功率激光扮演着不可替代的角色。众所周知，惯性约束核聚变研究就是以高功率激光作为点火驱动装置的。尽管高功率激光造价昂贵，但不少发达国家还是基于本国的国情，建造了一些大型激光装置，例如美国的国家点火装置NIF、日本的Gekko XII、法国的LULI、英国的VULCAN以及我国的神光II等。其中最著名的当属美国利弗莫尔国家实验室的NIF——共计192束激光，总能量高达 2×10^6 J。这种激光器的主要特点是能量高，单脉冲能量普遍在千焦耳以上。激光脉冲宽度一般为纳秒量级。将这种高强度的激光脉冲聚焦到毫米或微米量级的空间尺度，可以产生约 10^{15} W/cm²的光强。在这样的高光强下，物质瞬间会被电离成等离子体状态，等离子体的温度、压强、密度等参数与很多天体现象类似，从而营造出类天体环境的物理条件。利用强激光与物质相互作用，模拟天体环境，进行天体物理研究是强激光实验室天体物理的基本思想。除了激光器外，其他的高功率脉冲装置，比如Z-箍缩装置，也可用于实验室天体物理研究。但是迄今为止的大部分天体物理实验都是利用激光器进行的。本文将仅介绍强激光实验室天体物理的几个研究进展。

实验室天体物理始于上世纪90年代，近年得到蓬勃发展。美国NIF计划的首要目标虽然是实现激光核聚变点火，但实验室天体物理也是其重要研究方向之一。2000年，中国科学院物理研究所的张杰院士和国家天文台的赵刚研究员共同撰文^[1]，首次在我国系统介绍了强激光实验室天体物理学的内涵和当时关注的主要问题，由此拉开了我国在该领域的研究序幕。

实验室天体物理是激光科学与天体物理的交叉前沿，研究内容非常广泛，涉及很多的天文状态、现象和过程，比如物态方程、不透明度、等离子体光谱、流体力学等。物态方程是指一个系统的温度、压强、密度等状态参量所满足的关系式，反映系统的物理性质和演化规律。不透明度

是描述天体辐射吸收性质的参量。天体的辐射吸收性质与其结构、演化进程等密切相关，所以，获知天体的物态方程和不透明度对于认识恒星、行星等的形成和演化等非常重要。由于天体环境非常复杂，影响等离子体物态方程和不透明度的因素多种多样，天体理论计算结果往往与实际情况不吻合。在实验室内，通过测量与天体等离子体类似条件下的状态参量或X射线吸收数据，可以方便地研究物态方程或不透明度，同时还可为其他天文研究提供详尽的信息和证据。关于物态方程和不透明度研究的介绍可参考文献[1, 2]。光谱探测一直是天体物理领域重要的研究手段。从宇宙光谱中，科学家们可以推断发生的物理过程和天体结构。在实验天体物理研究中，等离子体光谱同样重要，如文献[3]中，通过对等离子体X射线吸收谱的探测，研究了致密天体(如黑洞)的光致电离过程。流体力学过程是宇宙中普遍存在的物理现象。起初，实验室天体物理研究的流体力学问题主要局限于超新星和超新星遗迹。如今，已扩展到太阳、日地空间以及其他天体现象，涉及冲击波、磁重联、喷流等多个研究问题。本文将重点对这些问题的研究进展进行简要介绍。

2 流体力学定标关系

在具体介绍研究进展之前，我们首先需要了解一下实验室天体物理的重要理论依据——流体定标关系。

天体物理过程的空间尺度高达光年¹⁾，时间尺度长达数百年乃至亿年。而在实验室中，激光等离子体的尺寸在毫米量级，持续的时间在纳秒量级。如此巨大的时空差别，怎样才能把天体和实验室中的物理过程对应起来呢？基本的思路是：针对具体问题，忽略不必要的物理因素，建立近似的理论模型，再根据理论模型对两个体系进行标度变换。在流体力学模型中，按照相对论效应，可以分为相对论流体力学、非相对论流体力学；根据磁场的作用，分为纯流体力学、磁流

1) 光在真空中沿直线传播一年的距离。

体力学；按照辐射性质，又分为绝热流体力学和辐射流体力学。目前已经开展的实验室天体物理研究主要是非相对论流体力学过程。上世纪末，Ryutov 等人就针对忽略热传导、辐射和粘滞效应的纯流体过程进行了标度变换的理论研究^[4]，后来又研究了磁流体的情况^[5]。随着研究问题的深入，人们又计算出特定情况下的辐射流体力学等标度变换关系^[6-9]。流体力学定标关系的本质是相似性原理——在近似条件下，将密度、压强、速度、时间、长度等参数按照一定比例关系缩小，而描述体系的物理方程不变。也就是说，当两个体系初始时刻主要参数的空间分布一致，并满足一定的比例关系时，由于描述物理规律的方程一致，所以这两个体系将发生相似的物理过程，出现类似的物理现象。因此，利用这些标度变换，可以通过实验室中小尺度、短时间的实验研究，来模拟大尺度、长时间的天体物理过程。一些常见的模拟实验中，实验室的 1 ns 对应天体的几十秒，1 mm 对应宇宙中的上万公里，可谓是“地上方一日，天上千万年”！

虽然流体力学定标关系为我们提供了实验室天体物理的理论依据，但并不是所有物理过程都可以使用此定标关系。例如，在纯流体力学定标关系中，只有满足多方气体近似条件的系统，才可以进行标度变换。系统是否满足多方气体近似条件，主要从碰撞、热传导、辐射、粘滞性四个方面进行判断。在碰撞方面，要求系统的粒子是局域化的，即电子、离子、中性粒子只能在相对于系统的特征长度 h 十分微小的尺度内做微观运动，即要满足离子平均自由程远小于 h ，或者在弱磁场环境下离子的回旋半径远小于 h (存在背景磁场的情况要求磁场强度足够小，磁压相比于热压可以忽略)。在热传导和辐射方面，要求系统中通过粒子间碰撞和辐射传输的能量远小于通过对流传输的热能(贝克莱系数 Pe , $Pe_V \gg 1$)。同时系统的粘滞效应须忽略不计(雷诺数 $Re \gg 1$)。下面介绍的无碰撞冲击波、磁重联和喷流等方面的研究成果就是利用了流体力学标度变换，将实验室

结果与天体现象联系在一起的。

3 无碰撞冲击波

超新星作为恒星发展的最后阶段，是宇宙中最剧烈的天体现象之一。它与天体的演化、元素的形成、宇宙射线的加速等重要天文问题密切相关。超新星和超新星遗迹中，普遍存在无碰撞冲击波过程。当波在介质中传播的速度超过声速时，就会形成冲击波。在波前处介质的温度、压强、密度等物理参量会发生跳变。原子弹爆炸时，爆炸中心压力剧增，使空气猛烈震荡会形成冲击波；超音速飞机在空气中穿梭，也会形成冲击波；宇宙中天体爆炸，如超新星爆炸，同样会形成冲击波。冲击波伴随着巨大的能量释放过程。天体中的冲击波还会加速带电粒子成为高能粒子和宇宙射线。地球上的冲击波一般靠粒子间的碰撞来传递振动信息，但是宇宙中许多大尺度等离子体的粒子密度很低，粒子间的平均碰撞自由程²⁾很大，这导致体系内粒子间是“无碰撞”的，这时等离子体中的带电粒子可通过电磁场相互作用来传递振动信息。这种利用非弹性碰撞过程进行振动传播的冲击波，被称为“无碰撞冲击波”。对于无碰撞冲击波的形成、演化、释能等过程，以及其对粒子的加速机制一直是天体物理的重要研究课题。

实验室天体物理对无碰撞冲击波的研究起步较早，现在已经取得了阶段性的进展。我们曾在实验室中成功再现了无碰撞冲击波过程^[10]，并对无碰撞冲击波的“不稳定性成丝”进行了较为深入地研究^[11]。随后，美国的一个研究小组利用质子束成像手段，也观测到冲击波不稳定性成丝^[12]；最近，他们又在实验中进一步证明，由于 Weibel 不稳定性，等离子体中产生的强磁场诱导了无碰撞冲击波的形成^[13]。此外，日本、法国等国家，也都在冲击波研究领域取得一些结果^[14-16]。目前，人们已经可以在实验室中产生多种参数的冲击波，接下来的研究将普遍关注于冲击波对粒子

2) 大量粒子组成的系统中，一个粒子在连续两次碰撞之间可能通过的各段自由程的平均值。

的加速问题。关于无碰撞冲击波更为详细的介绍，可以参考文献[16]。

4 磁重联

磁重联是指在具有有限电导率的磁等离子体中，电流片³⁾中的磁力线自发或被迫断开和重新连接的过程，磁能会突然释放并转化为等离子体的动能和热能，引起带电粒子的加速或加热(图1)^[17]。磁重联是宇宙中普遍存在的一种能量转换机制。

太阳内部频繁地进行着磁重联过程，磁重联又会引起多种常见的太阳活动现象，如太阳耀斑。太阳耀斑是太阳表面突然出现、迅速发展的闪耀亮斑，其中伴随着巨大的能量释放，大量的粒子在此过程中被加速。太阳耀斑产生的高能粒子和宇宙射线与地球大气分子发生剧烈碰撞时，会破坏电离层，干扰无线电通信，甚至可能导致无线电通信的中断；高能带电粒子同时会干扰地球磁场，诱发磁暴。所以，对太阳耀斑的研究不仅具有重要的科研意义，而且对人们的生产生活、灾难预防、航空航天等都有重要的实际应用价值。

地球周围的日地空间同样发生着磁重联过程。在纬度接近地磁极的地区上空，常常出现多彩绚丽的极光现象。极光是由高能粒子进入地球高层大气时，碰撞大气原子、分子并使其激发、发光而形成的。这种高能粒子正是源自于地球磁尾处的磁重联。太阳风是从太阳表面射向宇宙空间的磁化等离子体，里面包含着大量的电子和离子。当太阳风撞击到地球后，受太阳风作用，地磁场的拓扑结构会发生诸如拉伸、压缩等改变(图2)。畸变的磁场在地球磁尾处形成电流片，发生磁重联(图2中红框区域)。磁重联加速的高能粒子一部分向地球运动，在两极附近进入大气层，诱

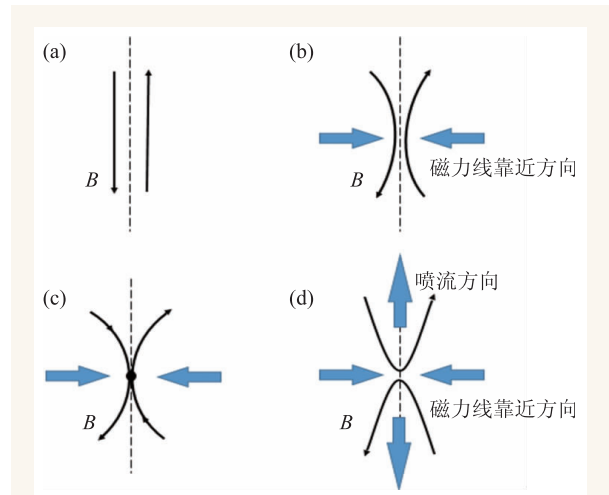


图1 磁重联过程示意图

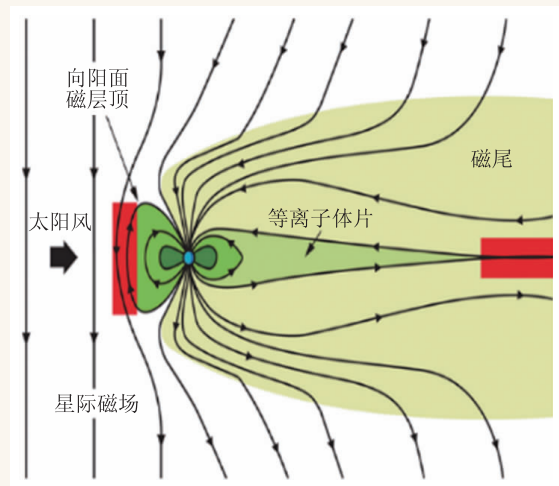


图2 地球附近的磁场分布

发绚丽的极光。

我们利用国内的“神光II”激光装置，对太阳耀斑和日地空间的磁重联现象进行了比较深入的实验研究。当高强度激光照射到固体靶⁴⁾时，在等离子体中可自发产生螺旋形百特斯拉磁场。该磁场被“冻结”⁵⁾在等离子体表面附近^[18]。利用两束强激光打在同一靶面上两个相近的点，随两个等离子体的膨胀，在两靶点中间区域，反向的磁力线将相互靠近、发生重联。我们用此方式模

3) 介于两个反向磁场之间的电流薄层，亦称中性片。

4) 在激光和物质相互作用实验中，激光照射的小尺寸物体被称作“靶”，激光和靶的作用被称为“打靶”，激光照射点为“打靶点”。

5) 即磁冻结，当磁雷诺数足够大时，磁感线粘附在流体质点上，随流体一起运动，如同磁感线被“冻结”在了导电流体中一样，被称之为磁冻结效应。

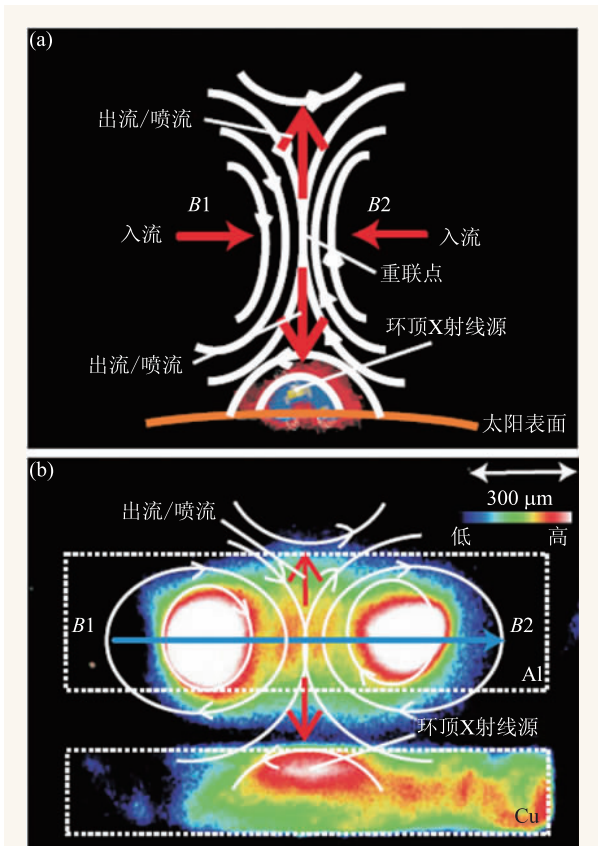


图3 天文观测和实验结果的对比^[19] (a)太阳耀斑环的天文观测结果；(b)实验所测靶面X射线成像

拟了太阳耀斑的磁重联过程，首次在实验中观测到磁重联的重要标志之一——环顶X射线源。实验结果如图3所示^[19]，图3(a)是太阳耀斑磁重联的天文观测结果；图3(b)是实验中利用针孔相机⁶⁾测量得到的靶面X光像，其中，两个白色亮斑为激光打靶点，白线描绘出了自生磁场的几何结构，红色箭头标注的是磁重联产生的喷流的运动方向。向下运动的喷流撞击到下方铜靶(用来模拟太阳表面等离子体)，铜靶被加热后辐射出X射线，形成X射线源。对比图3(a)和(b)，可以发现天文观测和实验结果十分吻合。该实验验证了天文学中关于太阳耀斑磁重联过程的推断，同时证明了利用强激光进行磁重联实验研究的可行性。《自

6) 利用小孔成像原理，对X射线进行成像的一种实验诊断。
 7) 一种光学成像诊断，利用干涉原理，通过干涉条纹移动反演出等离子体密度分布。
 8) 利用相机对高温等离子体受激发辐射的光子进行的成像。
 9) PIC是Particle in Cells的简写，PIC理论模拟即通过追踪带电粒子进行数值计算的模拟方法。

然中国》评价该实验为“实验台上的太阳耀斑(bench-top solar flares)”^[20]。

随后，我们采用两个分离靶代替单个平面靶，对磁重联过程进行了进一步研究^[21]。图4是实验得到的干涉图⁷⁾、自发光成像⁸⁾和PIC理论模拟⁹⁾结果的对比。从图4中可以看到，在重联区域的下方形成了三个喷流，分别位于重联中心和两侧，并且中心的喷流速度明显更快。利用实验结果估算出的中心喷流速度高达600 km/s。实验中还观测到磁重联区产生了向外运动的“磁岛”，磁岛的快速运动改变了重联的磁场结构，导致了二阶电流片和耀斑环的产生。

最近，我们又对太阳风和金星相互作用过程进行了实验研究。金星作为太阳系八大行星之一，它的半径等宏观参数和地球类似，被称为地球的“姊妹星”。尽管从天文观测数据来看，金星表面气候参数和地球气候参数有着很大差异，但是科学家们推测，金星内部构造可能与地球十分相近。从上世纪60年代以来，人们对金星的天

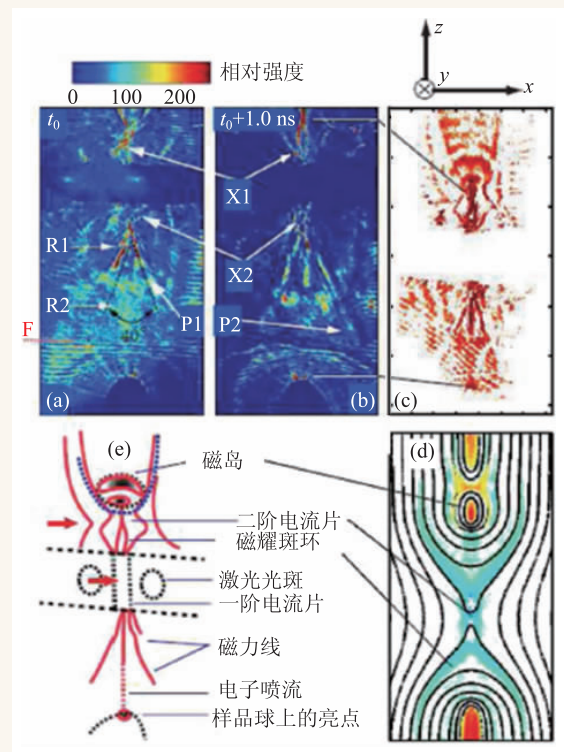


图4 光学成像和理论模拟^[21] (a)和(b)对应不同时刻的干涉成像；(c)等离子体自发光成像；(d)PIC理论模拟结果；(e)轮廓示意图

文探测从未间断过，发送或路过金星的探测器已经超过40个。金星又是太阳系中唯一没有固有磁场的行星。同地球一样，金星也受到太阳风的强烈作用。实验中，我们利用激光照射平面靶，用靶背面“推出”的大尺寸、高速度等离子团来代替“太阳风”，进行“太阳风和金星相互作用”模拟实验。实验中观测到了与金星磁尾类似的等离子体结构。相关的理论模拟工作还在进行中。

5 喷流

天体中的喷流是天体喷出的狭长、准直、高速、定向物质流，比如Herbig—Haro星体的双对称结构喷流(图5)^[22]。喷流长度在 10^{17} — 10^{24} cm范围内，随着星体的不同而不等；流速达到几百公里每秒，是介质声速的10倍以上。喷流作为基本的天体结构，它的产生、准直、碰撞、偏折等机制一直是天体物理中的重要研究问题。

利用强激光产生的喷流，按照激光打靶方式分为靶前喷流和靶后喷流(激光照射面为靶前)。相对于靶后喷流而言，靶前喷流一般温度较高、密度较低、速度较快。在靶后喷流的实验中，通过在喷流传播路径放置不同介质，可以方便地研究介质对喷流的影响^[23]。目前，人们研究较多的是靶前喷流，如文献[24]中，Li C.K.采用多束激光照射平行放置的两个平面靶内表面，形成相向运动的两束喷流，研究了高马赫数喷流的碰撞偏折问题。

对于喷流的产生机制主要有两种观点：纯流体模型和磁流体模型。目前，磁流体模型普遍为人们所接受。在磁流体模型中，吸积盘周围的等离子体受磁场作用进入吸积盘中心，并在磁场作用下完成角动量向轴向双极动量转化的过程。最近，Albertazzi等人利用四个线圈产生方向如图6(a)、强度0.2 MG的磁场，通过光学成像探测喷流的内部结构，并进行了相关的磁流体力学模拟。结果证明了角向磁场对等离子体准直的影响，揭示了年轻星体(YSOs)中双极喷流的形成

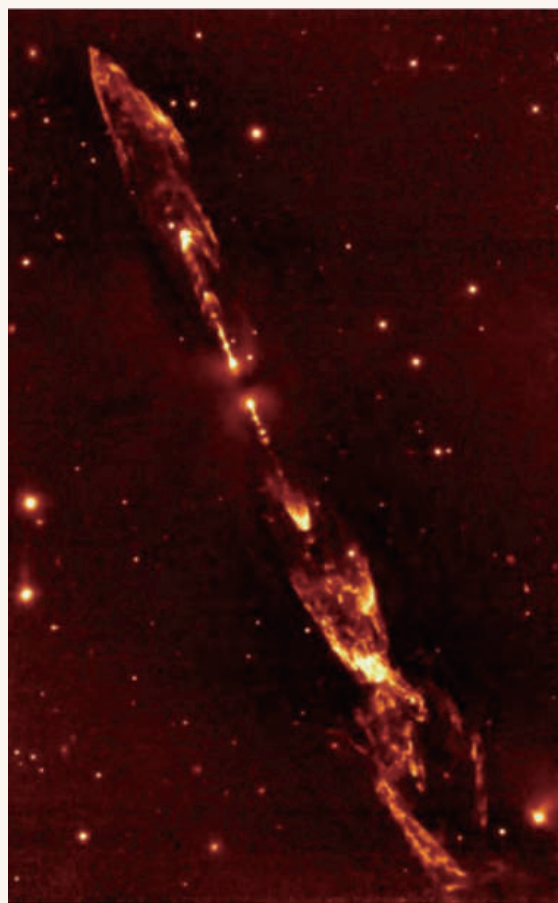


图5 HH212天体喷流的H α 自发发光像^[22]

过程^[25]。喷流研究成果还有很多，具体可参考文献[2, 23]。

6 超强磁场产生

磁场广泛弥漫于宇宙环境中，大多数天体过程都会受到磁场的影响。然而，实验室对磁场环境下天体物理的研究却面临很多困难，其中首要的是强磁场的产生。宇宙中的许多天体都是极强的磁体，如中子星，它的磁场强度是地球磁场强度的100万亿倍(地磁场强度约为 5×10^{-5} T)^[26]。尽管星际间的磁场强度很弱(如地球附近太阳风磁场约为 10^{-9} T)，但是经过磁流体力学定标变换，要在实验室模拟类似的物理环境，仍需要几十甚至几百特斯拉的强磁场。较强的铁磁材料，表面磁场强度仅有零点几特斯拉；传统的电磁铁线圈

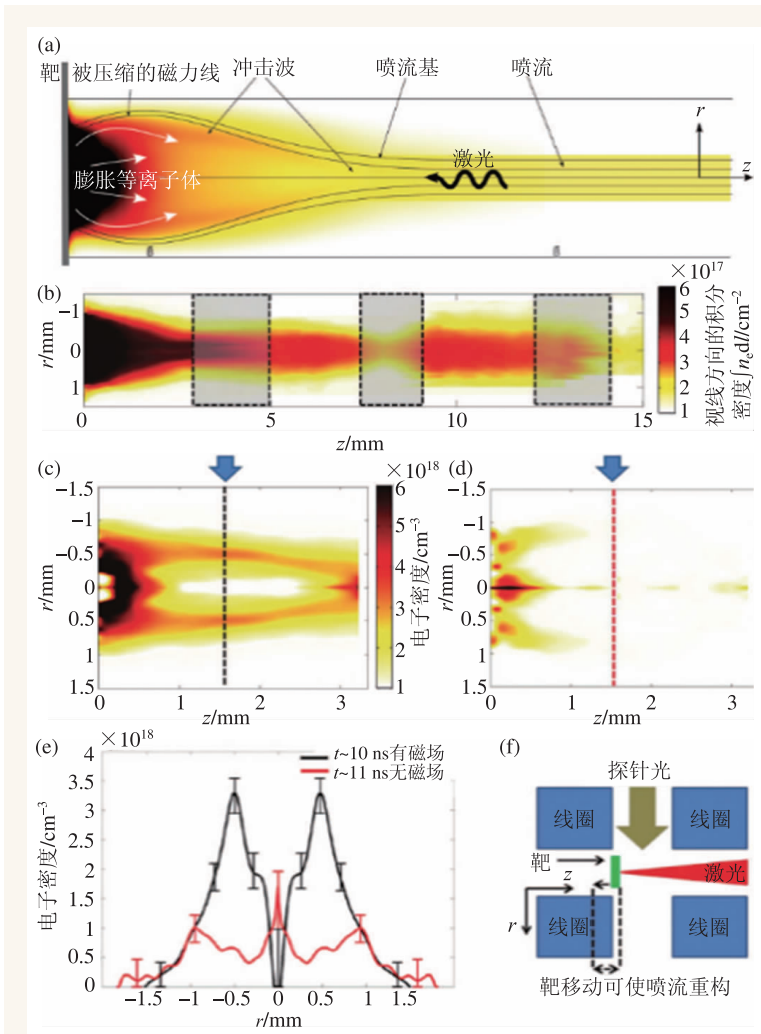


图6 利用磁场对喷流进行准直的实验结果^[25] (a)喷流形成机制示意图; (b)20 ns延迟时喷流整体等离子体密度分布; (c)和(d)分别为有磁场和无磁场情况下喷流局部等离子体密度分布; (e)虚线处密度分布曲线; (f)靶和磁场分布

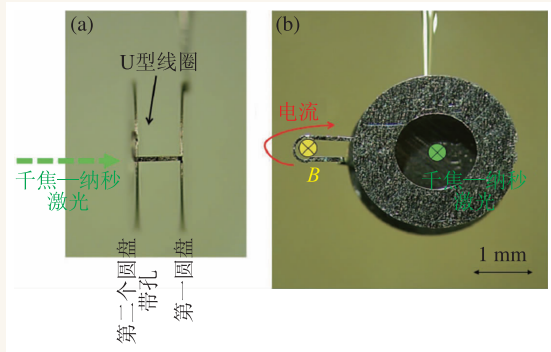


图7 电容靶图^[27] (a)侧面; (b)正面

产生的稳恒磁场，场强只能达到几特斯拉；脉冲强磁场的强度，最强也不过上百特斯拉。无论是稳恒磁铁线圈还是脉冲线圈，进一步提高磁场强

度都面临着巨大困难，而且对实验布局 and 材料提出了苛刻的要求。比如，稳恒电磁铁的体积非常大，难以放在强激光实验的真空靶室内；在高强度电流状态下，脉冲线圈的金属丝极易融化。2012年，Fujioka等人利用强激光照射电容线圈靶，得到了千特斯拉量级的超强磁场^[27]。他们的实验靶型如图7所示，强激光从环状极板中间的小孔穿过，打在后面的圆盘极板上，激光加速的超热电子飞离圆盘极板，迅速到达前面的环形极板，从而在两极板和螺旋导线间形成了电流回路，并在螺旋导线处诱发千特斯拉磁场。最近，我们采用更为简单的线圈靶型，在神光II激光装置上，得到了约600 T的强磁场。同时在实验中研究了场强和激光的关系，通过改变激光参数可以实现对磁场强度的控制。这种简单的靶设计，无论从靶制备，还是与其他实验的结合应用，都更加便捷。

这种近千特斯拉的超强磁场不仅在实验室天体物理中有重要应用，还可以作为一种强有力的调控手段，应用到凝聚态等物理其他领域。

7 结论和展望

以上简要介绍了实验室天体物理学的基本思想和一些问题的新进展。虽然实验室天体物理的发展时间不长，但是相关研究成果证明了其可行性，并取得了一批重要成果。然而，实验室天体物理还是相对年轻的学科，很多的重要问题亟待探索，实验技术和理论模拟能力也需要进一步发展。

本文介绍的研究进展都属于非相对论情况，实验所用激光装置为纳秒、高功率大型激光装置。上世纪80年代，Morou发明了啁啾激光脉冲放大技术，将激光脉宽压缩到了飞秒尺度，相应

的激光光强提高了几个量级, 可达到 10^{20} W/cm² 以上。当激光强度大于 10^{18} W/cm² 时, 电子在电场中的振荡速度接近光速, 激光和等离子体作用会呈现明显的相对论效应。天体中很多现象都是相对论性的, 超短超强激光为开展相对论实验室天体物理研究提供了有力手段。在相对论范畴, 无论是无碰撞冲击波, 还是喷流等都将与前面非相对论情况有很大不同^[28]。利用超短超强激光还可以开拓新的实验室天体物理研究方向, 例如相对论电子的加速和辐射问题、宇宙射线的相对论加速机制、极强宇宙磁体的模拟研究以及相对论极端条件下的其他天体过程^[29]。实际上, 国内外很多研究组都拥有这种超短超强激光装置。

参考文献

- [1] 张杰, 赵刚. 实验室天体物理学简介, 2000, 29: 393
- [2] Remington B, Drake R, Ryutov D. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78: 755
- [3] Dong Q L, Wang S J, Li Y T *et al.* *Phys. Plasmas*, 2010, 17: 012701
- [4] Drake R P, Ryutov D, Kane J *et al.* *Astrophys. J.*, 1999, 518: 821
- [5] Ryutov D D, Drake R P, Remington B A. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2000, 127: 465
- [6] Murakami M, Iida S. *Phys. Plasmas*, 2002, 9: 2745
- [7] Castor J I. *Astrophys. Space Sci.*, 2006, 307: 207
- [8] Ryutov D D, Remington B A, Robey H F *et al.* *Phys. Plasmas*, 2001, 8: 1804
- [9] Falize É, Bouquet S, Michaut C. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2008, 112: 042016
- [10] Liu X, Li Y T, Zhang Y *et al.* *New J. Phys.*, 2011, 13: 093001
- [11] Drake P. *Nat. Photonics*, 2011, 5: 644
- [12] Fox W, Fiksel G, Bhattacharjee A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 225002
- [13] Huntington C M, Fiuza F, Ross J S *et al.* *Nature Phys.*, 2015, 11: 173
- [14] Morita T, Sakawa Y, Kuramitsu Y *et al.* *High Energy Density Phys.*, 2013, 9: 187
- [15] Dizière A, Michaut C, Koenig M *et al.* *Astrophys. Space Sci.*, 2011, 336: 213

我们相信, 这一新趋势会越来越引起大家的研究兴趣。

致 谢 文中部分成果是与中国工程物理研究院激光聚变研究中心、中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室、上海激光等离子体研究所、北京应用物理与计算数学研究所、北京大学、中国科学技术大学、大阪大学激光工程研究所、韩国原子能研究所量子光学实验室等相关研究人员合作完成的, 在此一并表示感谢。另外作者还感谢神光 II 激光装置全体运行人员的大力支持。

- [16] Yuan D W, Li Y T. *Chin. Phys. B*, 2015, 24: 015204
- [17] 王水, 李罗全. 磁场重联. 合肥: 安徽教育出版社, 1999. 3
- [18] Stamper J A, McLean E A, Ripin B H. *Phys. Rev. Lett.*, 1978, 40: 1177
- [19] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G *et al.* *Nature Phys.*, 2010, 6: 984
- [20] <http://www.naturechina.com.cn/nchina/2010/101201/full/nchina.2010.136.html>
- [21] Dong Q L, Wang S J, Lu Q M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 215001
- [22] Bally J. *Astrophys. Space Sci.*, 2007, 311: 15
- [23] Foster J M, Wilde B H, Rosen P A *et al.* *Astrophys. J. Lett.*, 2005, 634: L77
- [24] Li C K, Ryutov D, Hu S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 235003
- [25] Albertazzi B, Ciardi A, Nakatsutsumi M *et al.* *Science*, 2014, 346: 325
- [26] <http://discovermagazine.com/galleries/zen-photo/m/magnets>
- [27] Fujioka S, Zhang Z, Ishihara K *et al.* *Scientific Rep.*, 2013, 3: 1170
- [28] Bulanov S V, Esirkepov T Z, Kando M *et al.* *Plasma Phys. Rep.*, 2015, 41: 1
- [29] Li Y T, Liao G Q, Zhao G *et al.* *Scientia Sin. Phys., Mech. & Astron.*, 2013, 43: 795