

快点火激光核聚变和实验室天体物理中的几个前沿问题

李玉同

(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)

摘要 高能量密度物理(HEDP)是一个近年发展起来的充满新物理现象和具有重要应用前景的交叉前沿领域。高能量密度状态在天体中普遍存在。随着高功率激光器、高能粒子束和 Z-箍缩发生器的发展,在实验室产生高能量密度的条件日益成熟。对基于强激光的高能量密度物理的研究现状和几个前沿问题进行了简单介绍,重点综述激光惯性约束聚变快点火方案和实验室天体物理的新进展。

关键词 高能量密度物理;强激光;快点火激光核聚变;实验室天体物理

中图分类号 O437

OCIS 320.2250 320.7710

文献标识码 A

Frontier of High-Power-Laser-Based High Energy Density Physics

Li Yutong

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

Abstract High energy density physics(HEDP) is a rapidly growing frontier field, in which new physical phenomena are rich and important applications have been applied or prospected. The matter of high energy density is normal in universe. However, with the developments of high-power laser, Z-pinch, and ion accelerator facility, it is feasible to create such matter in laboratories. New developments and important scientific problems of high-power laser-based HEDP particularly on the fast ignition of inertial confinement fusion and laboratory astrophysics are briefly introduced.

Key words high energy density physics; high power laser; fast ignition of inertial confinement fusion; laboratory astrophysics

1 高能量密度物理研究的现状和科学问题

高能量密度物理(HEDP)是近年来发展起来的交叉前沿领域,是一门研究能量密度超过 10^{11} J/m³(相当于压力超过 10^{11} Pa)极端物理条件下物质结构与特性及其发展规律的科学。通常极端的高能量密度物理状态只存在于天体以及核武器的爆炸中。近年来,随着高功率激光器、高能粒子束和 Z-箍缩发生器的能量、功率的不断提高,使得在实验室产生高能量密度物理状态的条件日益成熟。另外,基于高性能计算机的大规模数值模拟技术的发展,也使得这一领域的研究更加广泛和深入。

高功率激光器是从事 HEDP 研究的重要实验装置。利用不同输出能量和脉冲宽度的激光装置,可以产生非常广泛的高能量密度状态。用于 HEDP 研究的强激光可以分成两大类,一类是能量从几千焦耳到百万焦耳、脉宽在纳秒量级的高功率激光,在靶面的聚焦光强(单位时间单位面积的能量)为 $10^{13} \sim 10^{15}$ W/cm²。典型代表是美国利弗莫尔国家实验室新建成的国家点火装置(NIF),总能量约 1.8 MJ,脉宽 5~10 ns,共 192 束。日本的“Gekko XII”、我国的“神光”、法国正在建设的兆焦耳(LMJ)装置都属于这一类;另一类高功率激

收稿日期: 2009-12-15; 收到修改稿日期: 2010-03-01

基金项目: 国家 973 计划(2007CB815101)和国家杰出青年科学基金(10925421)资助课题。

作者简介: 李玉同(1968—),男,研究员,主要从事强激光与物质相互作用和高能量密度物理等方面的研究。

E-mail: ytli@aphy.iphy.ac.cn

光是基于脉冲啁啾放大(CPA)技术的超短超强激光。这类激光又可以分成两种,一种是能量从几十到几千焦耳的皮秒激光器;一种是能量在毫焦耳到几十焦耳量级的飞秒激光器。和第一类装置相比,利用 CPA 技术在台面尺寸上就可以建造峰值功率提高 6~7 个量级的小型强激光装置。虽然能量不是很大,但是由于脉宽很短,其聚焦光强可以大于 10^{20} W/cm²。这给物理学的研究提供了革命性的手段。由于造价低,此类激光器广泛应用于各大学和一般的激光实验室,研究的物理问题也极其丰富,在电子、离子加速、超快 X 射线光源和阿秒科学等多方面都展现出了极大发展前景和潜力。国际上代表性的装置是欧盟超强激光(ELI)装置,其设计峰值功率为 220 PW,聚焦光强为 10^{25} W/cm²。

美国对 HEDP 的研究极为重视,为了对 HEDP 进行全面的评估,美国国家研究委员会(NRC)于 2001 年成立了 HEDP 专门委员会,对极端条件下的物理研究进行规划和前景分析。经过认真调研和总结,该委员会发布了题为“高能量密度物理学前沿-当代科学的 X 策略”的报告^[1],这份报告系统总结和评估了美国在该领域的现状,归纳出了 17 个重大科学问题,指出当前正是研究 HEDP 的重大机遇期,是做出重大突破的好时机,向美国国家实验室和大学强烈推荐开展 HEDP 研究,并建议政府予以大力资助。

基于强激光的 HEDP 的研究内容极为丰富。这里仅给出 6 个目前国内外学者非常感兴趣的研究方向和问题:

1)激光惯性约束核聚变(对未来能源有重要意义,也与核武器物理密切相关);

2)新型小型化电子、离子加速器(具有极大的加速梯度,可以降低加速器造价;在高能物理和医疗等方面有重要应用);

3)新型辐射源(可以产生从太赫兹到 γ 射线波段的高功率辐射);

4)天体物理过程的实验室模拟(在实验室中进行主动、可控、近距离的天体物理现象再现和模拟,可以极大扩充人类对于自然界的认知);

5)阿秒超快物理;

6)和其他学科的交叉研究方向,比如超快化学、生物等。

这些问题的研究对于认识基本物理规律、未来能源和武器研究等有重要影响。限于篇幅,本文只简单讨论与快点火激光核聚变和实验室天体物理有关的几个问题。

2 快点火激光核聚变

传统的惯性约束核聚变主要通过对氘氚靶丸的均匀向心压缩、加热而产生的中心点火来实现^[2]。如果激光的焦斑不均匀或者靶面不够光滑,就会在有加速度的两种密度不同的流体界面上发生瑞利-泰勒不稳定,这种不稳定性会把靶丸压缩过程中出现的任何不均匀指数放大,从而造成压缩失败,所以惯性约束核聚变对激光辐照的球对称性和均匀性有极高要求。

传统的惯性约束核聚变有直接驱动和间接驱动两种方式。无论哪种方式,都是为了对核燃料靶丸进行压缩,使靶丸中心的温度和密度满足瑞利判据,实现自持燃烧。要达到这样的条件,需要兆焦耳量级的大型激光装置,美国的 NIF、法国的 LMJ 装置都采用的这一技术路线。

CPA 技术使得激光的脉宽大幅度缩短到皮秒和飞秒量级,从而靶面的聚焦强度达 $10^{18} \sim 10^{20}$ W/cm² 甚至更高。在这样高的强度下,电子在激光场中的运动处于相对论状态,振荡速度接近光速,其能量可以远大于电子的静止质量(0.511 MeV),因此能够产生能量很高的电子束流。据此人们提出了“快点火”激光核聚变的概念,就是当靶丸压缩到一定程度后,再利用一束超强激光与靶丸相互作用,产生高能电子束流,由电子束流将能量传输、沉积到靶丸内部,实现点火^[3]。目前日本大阪大学的聚变实验激光器(LFEX)计划和欧洲的高功率激光能量研究设施(HiPER)计划都是围绕快点火方式展开的。

图 1 为快点火和中心点火产生的理论能量增益与驱动激光能量的关系。如图所示,快点火是一种低阈值、高增益、高效率的方案,0.1~0.2 MJ 的驱动能量就可以得到大于 10 的增益。而要得到类似的增益,中心点火方案需要大于 1 MJ 的激光能量。由于对压缩要求的降低,快点火还可以避免中心点火中遇到的流体力学不稳定性问题,从而大大降低了对靶的设计、光束质量和辐照均匀性的要求。从长远角度讲,快点火的高增益为解决未来的能源问题提供了新的思路。

虽然快点火很有特点,但是还有一些关键问题需要进一步研究。这些问题主要包括:1)长脉冲激光对空心气体靶丸的对称压缩问题,尤其是近年发展起来的锥壳靶对称压缩问题(锥壳靶问题将在后面谈到);2)超强加热激光脉冲在等离子体中的开通道和能量吸收问题。如果采用锥壳靶方案,将主要考虑锥靶内部的物理过程;3)超热电子的产生、输运和能量沉积问题;4)点火后的持续燃烧问题。其中第3点是关系到快点火能否成功的关键问题。

快点火概念要求在激光等离子体作用中,入射激光能量能够有效地转移给电子,产生一束高质量的超热电子束。实验和粒子模拟都证明,激光到超热电子的转换效率可以达到20%~40%。超热电子的产生和激光吸收机制密不可分。人们已经发现和提出了多种超强激光与高密度等离子体相互作用的能量吸收和超热电子加速机制。比如:共振吸收、 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 加热、真空加热、随机加速、拉曼散射等参量不稳定性、相对论通道中的B-loop机制和逆自由电子激光机制等。

超热电子只能在临界密度面以下的区域产生,之后会以强电流的形式向高密度靶丸输运。为了满足点火要求,需要把10~20 kJ的能量在10~20 ps的时间内传输并沉积在靶芯中,所以超热电子的束流强度将高达几百兆安,甚至吉安。在真空中,由于自生磁场的作用,电流传输存在一个所谓的阿尔芬极限电流,如果电流强度超过该极限,电流将不能向前传播。在等离子体中,通过背景冷电子回流对超热电子束流诱生电场的补偿,超热电子束流仍然可以向靶丸输运。但是这种对流的系统是不稳定的,有可能激发双流不稳定和横向的Weibel不稳定性等,从而导致电流成丝、合并、强自生磁场和电场、等离子体欧姆加热等复杂的物理过程。

从超热电子产生区域(临界密度面附近)到靶丸中心的距离为200~300 μm ,但在这么短的空间尺度内电子密度却提高了5~6个数量级。为了避免加热强激光在低密度区的传播和降低超热电子束流的输运距离,提高激光到靶丸的总体耦合效率,日本大阪大学在2001年提出了一种空心锥壳靶方案^[4,5],如图2所示。靶由直径500 μm 的内爆CD球壳和锥角60°,锥尖厚度5 μm 的空心锥两部分组成,锥尖到CD壳中心的距离为50 μm 。实验中首先用“Gekko XII”的9束脉宽1.2 ns,总能量2.5 kJ的激光压缩CD靶壳,之后用一束脉宽0.5~0.8 ps,最大能量300 J和波长1.053 μm 的加热脉冲从空心锥注入,在锥顶部产生超热电子,这些电子输运到靶丸中心,产生局域加热。实验表明,采用锥靶后,中子产额可以提高3个数量级。

该项研究引起了激光核聚变领域的广泛关注。虽然该实验很成功,但是在锥靶中发生的物理过程一开始并不是很清楚。数值模拟表明,锥靶会起两个重要作用^[6]:一是加热激光脉冲外围的能量并引导到顶端,从而使相互作用强度增大,提高了激光到等离子体的耦合效率;另一个是在锥靶内壁产生的高能电子也被引导到锥尖,其能量最终沉积到压缩靶丸中。中国科学院物理研究所对这一物理过程进行的实验和理论研究发现,当强激光的入射角较大时,会在沿着靶面方向产生方向性很好的超热电子束。这一结果对锥靶引导超热电子这一认识的有力支持^[7]。

快点火概念也在不断的演化和完善中,近年人们提出了一些新的改进方案。实验和理论都发现,在超强激光与等离子体相互作用中,除了超热电子外,还可以产生高能离子^[8]。在快点火的常规方案中,超热电子是将激光能量转移到高密度压缩区的重要能量载体。但是超热电子的射程长,很容易穿过聚变靶丸,所以能

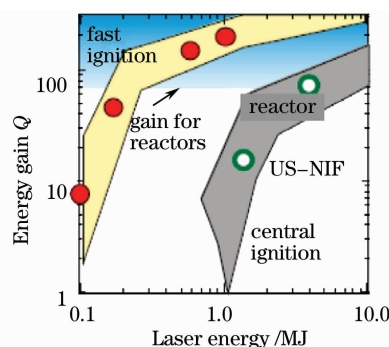


图1 快点火和中心点火产生的增益与驱动激光能量的关系

Fig. 1 Relation between energy gain and driving laser energy in fast ignition and central ignition

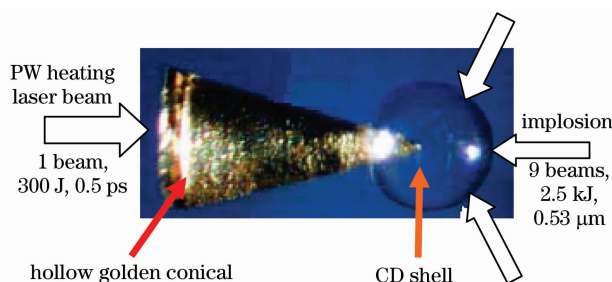


图2 快点火锥壳靶结构

Fig. 2 Conical target structure of fast ignition

量沉积效率较低;而高能离子可以把激光能量高效率地沉积在靶丸中,更有利于形成聚变热斑,所以人们提出了“超热电子+高能质子”混合点火方案或者离子点火方案。

为了使激光-等离子体耦合层靠近高密度压缩靶丸,早期的快点火方案需要在亚稠密等离子体区域开通道和在过稠密等离子体区域利用有质动力打孔。近年有人提出了一种不需要打孔的快点火方案,其中中心思想是将一束整形激光脉冲的能量有效沉积在预压缩靶丸的冕区,依靠产生的热波从能量沉积区扫过核燃料区实现点火。理论研究发现该方法的效率和中心点火相当,而且对预压缩靶丸的质量分布非对称性不敏感。

3 实验室天体物理模拟

一直以来,天文学家对天体现象的主要研究方法是被动的远距离观测和理论模拟。然而,对于一些天文现象的研究,要么由于观测资料太匮乏,对其特性的研究仅限于推测;要么由于距离地球太远,不易观测;或者是由于演化时间太长,在有限的时间内,很难有一个比较全面的认识。高功率激光技术的快速发展给天体物理研究带来了新的机遇。利用高功率激光装置,人们能够在微米-毫米量级尺度内聚积巨大的能量,可在实验室中创造与天体现象相似的极端物理条件。这样的实验条件是前所未有的、又与天体物理中一些重要的、关键性的问题直接对应的。这为科学家们在实验室中对天体问题进行主动、近距离、可控的研究提供了新思路和新方法,由此出现了一个新兴的学科——实验室天体物理学^[9]。

利用强激光和物质相互作用产生的等离子体可以模拟诸多天体物理的过程,如天体辐射不透明度、表面大气对白矮星和中子冷却影响、恒星状态方程、天体等离子体光谱、超新星不稳定性 and 天体射流等。本文只对致密天体产生的光电离和无碰撞冲击波过程进行简单介绍。

3.1 致密天体(黑洞)辐射产生的光电离

黑洞有着巨大的引力场,连光都无法逃逸,所以人们无法对它的内部状态进行直接观测。为了研究黑洞,天文学家将目光集中到了黑洞周围被称为“吸极盘”的旋转物质云团上。在吸极盘内环附近,物质流的重力能将物质加热到极高温度,产生的 X 射线辐射会电离外围物质从而发光。天文学家正是通过观测这些光电离谱线,再结合一定的理论模型,对黑洞进行间接研究的。所以谱线的辨认和理论模型的正确与否,对于认识黑洞极其关键。

早在 2000 年,中国科学院物理研究所和国家天文台的研究组就开始了实验室天体物理的理论和实验研究。过去几年,他们与日本、韩国的科学家合作,利用上海高功率激光物理国家实验室的“神光 II”和日本大阪大学的“Gekko XII”等强激光装置,对黑洞周围的光电离过程以及发出的 X 光辐射进行了细致的实验研究,其中和日本合作利用“Gekko XII”得到的前期结果已发表^[10]。实验中采用 12 路激光脉冲对称压缩一个 500 μm 的 CH 靶丸,由此产生了一个约 500 eV 辐射温度的强 X 射线光源,之后,用该光源对另一个低密度硅等离子体进行光电离。通过对实验结果的分析,以及与天文观测数据的对比,发现 Si 的 1.84 keV 谱线可能不是天文学家认为的“禁戒”跃迁线,而是另一种伴线跃迁的结果,该跃迁产生的谱线恰好和天文观测到的“禁戒”跃迁谱线重合。这个谱线与天文观测到的双星系统的 X 射线谱对应部分极其相似,如 Cygnus X-3 和 Vela X-1。但本实验利用细致 Non-LTE 模型对谱线成分特征的分析,却给出了与天体物理学家不同的解释。该实验结果有助于加深人们对致密天体周围物质结构的认识。

3.2 无碰撞冲击波实验模拟

无碰撞冲击波这一概念最早是 Roald Sagdeev 在 1966 年提出的,他指出冲击波可以不通过碰撞机制形成。在很长的一段时间内,这一概念遭到大量的质疑,直到在外太空首次观察到无碰撞冲击波为止。目前,无碰撞冲击波已经是天体物理中十分重要的现象之一,人们在超新星爆发的过程中以及地球和太阳之间均观察到了这种无碰撞冲击波。超新星是恒星演化的最终阶段,也是最激烈的天体现象之一。由于超新星与元素的演化、恒星的演化、高能粒子与物质的相互作用等许多天体物理的前沿课题有着密切的关系,因此对超新星的研究在天体物理中占有很重要的位置。在对超新星爆发过程的观测中,多次记录到了无碰撞冲击波的产生,并且观测到大量的高能宇宙射线和高能离子。通过对天文观测的结果进行分析,天体物理学家普遍认为,无碰撞冲击波中存在大量的能量传递和耗散机制,与高能粒子和宇宙射线的产生密切相关,所以其被越来越多的人所关注。

中国科学院物理研究所和国家天文台研究组与日本、韩国的科学家合作,利用上海高功率激光物理国家实验室的“神光Ⅱ”强激光装置,最近对无碰撞冲击波的形成和演化过程进行了细致的实验室研究。实验利用“神光Ⅱ”激光装置的8路激光,分南北两大束聚焦到两个CH薄膜上,产生两个高速、低密度、相向膨胀的等离子体,利用阴影成像和干涉仪对这两个等离子体的碰撞过程进行了观察。对于实验产生的等离子体条件,由于离子的平均自由程远大于两个等离子体的尺度,所以库仑碰撞机制不是两个等离子体间相互作用的主要机制。由此可知实验观察到的密度变化主要是由于两个等离子体之间的无碰撞机制产生的,所以被称为无碰撞冲击波。在实验室中对无碰撞冲击波的观测有助于理解天体中的无碰撞冲击波的物理过程。

4 结束语

对高能密度物理的现状和几个前沿问题进行了简单介绍。高能密度物理是一个充满新的物理现象和具有重要应用前景的交叉前沿领域,涉及到物理学的多个学科,目前正处于一个快速上升时期。我国应抓住这一机遇,根据我国的特点不失时机地开展理论与实验研究。

就本文主要讨论的快点火激光核聚变和实验室天体物理而言,由于目前还不具备进行真实快点火激光核聚变总体实验的条件,所以对快点火方案进行合理的分解实验,对其中的物理过程和所需的激光器技术分别进行研究,以达到对这一方案的可行性进行判断的目的,是目前激光等离子体研究领域的重要课题。此外,虽然在实验室中开展天体物理研究这一新兴学科还有待于进一步发展,但其可行性已为国内外的实验和理论证实,这为天体物理学研究提供了新的方法和思路,对扩充人类的认知有重要意义。

参 考 文 献

- 1 R. C. Davidson. *Frontiers in High Energy Density Physics*[R]. National Research Council, The National Academies of USA, 2002
- 2 Zhang Jie. An overview of inertial confinement fusion[J]. *Physics*, 1999, **28**(3): 142~152
张 杰. 浅谈惯性约束核聚变[J]. *物理*, 1999, **28**(3): 142~152
- 3 M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers[J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5): 1626~1634
- 4 R. Kodama, P. A. Norroys, K. Mima *et al.*. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition[J]. *Nature*, 2001, **412**(6849): 798~802
- 5 R. Kodama, H. Shiraga, K. Shigemori *et al.*. Fast heating scalable to laser fusion ignition[J]. *Nature*, 2002, **418**(6901): 933~934
- 6 Y. Sentoku, K. Mima, H. Ruhl *et al.*. Laser light and hot electron micro focusing using a conical target[J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(6): 3083~3087
- 7 Y. T. Li, X. H. Yuan, M. H. Xu *et al.*. Observation of a fast electron beam emitted along the surface of a target irradiated by intense femtosecond laser pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(16): 165003
- 8 Li Yutong, Xu Miaohua, Zhang Jie. Generation of high energy ions in ultraintense laser-plasma interactions[J]. *Physics*, 2007, **36**(1): 39~45
李玉同, 徐妙华, 张 杰. 超强激光脉冲与等离子体相互作用中高能离子的产生[J]. *物理*, 2007, **36**(1): 39~45
- 9 Zhang Jie, Zhao Gang. Introduction to laboratory astrophysics[J]. *Physics*, 2000, **29**(7): 393~396
张 杰, 赵 刚. 实验室天体物理学简介[J]. *物理*, 2000, **29**(7): 393~396
- 10 S. Fujioka, H. Takabe, N. Yamamoto *et al.*. X-ray astronomy in the laboratory with a miniature compact object produced by laser-driven implosion[J]. *Nat. Phys.*, 2009, **5**(11): 821~825