

激光驱动的 ICF 物理研究

陶祖聪 杜祥琬¹⁾ 彭翰生 贺贤士²⁾

(中国工程物理研究院, 成都 610003)

惯性约束聚变是近年来发展迅速、具有科学意义和应用前景的研究领域。本文概述了激光驱动的惯性约束聚变的物理过程和值得研究的物理问题;讨论了激光聚变物理与核武器物理的联系,说明军用研究是激光聚变研究近、中期应用的重要方面;介绍了中国工程物理研究院的激光聚变研究工作。

实现受控核聚变的途径主要有磁约束聚变(MCF)和惯性约束聚变(ICF, inertial confinement fusion)两种。

惯性约束聚变是利用高功率的脉冲能束,直接或间接地均匀照射微型聚变靶丸,由靶面物质的烧蚀喷射产生的反冲力(惯性力),使靶内的聚变燃料迅速被压缩至高密度(液态氘、氚密度的1000倍左右)和热核燃烧所必须的高温(10^8K),在惯性约束时间内发生微型热核爆炸,

聚效应是指在光场中检测到一个光子后,紧接着再检测到一个光子的几率要高于平均几率,好象光子在光束中是成群分布的。反群聚效应则相反,在光束中,一个光子附近出现另一个光子的几率小于平均几率。通过非线性光学过程如三波参量过程或多光子吸收过程,就可产生具有反群聚性的光场(实验上首次是在1977年通过共振荧光观察到光子反群聚效应的)。再如挤压态光场也可通过四波混频或简并参量放大等非线性光学过程产生。

其次,量子光学中一些特殊的检测或处理方法也要利用非线性光学过程,前面提到过的量子无损测量就是一个例子。

由此可见,量子光学与非线性光学之间有着十分密切的联系。研究各种非线性光学过程所得到的光场的量子统计和相干性质,是量子光学研究的一个重要领域。至于第二个尺度以上的强光与物质的作用,则目前还只处于一个开始的阶段。

另外还应提到的是,量子光学混沌和光学

释放聚变能(见图1)。

高功率脉冲能束又称驱动源。它可分为两类:(1)聚焦的强激光束,(2)聚焦的强流离子束(重离子束或轻离子束)。目前可实际应用的驱动源是强激光束。本文将主要讨论激光聚变。

60年代初,就提出了激光聚变的设想。70

1),2) 北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088.

孤立波的量子化也是近年来受到注意的领域。

我国的量子光学研究队伍是一支年青的队伍,1984年才开始组织全国性的学术讨论。经中国物理学会同意,1990年11月,在成都召开的第四届全国量子光学学术讨论会上,成立了中国物理学会量子光学专业委员会。该委员会将组织各种科研协作、学术交流和人才培养等活动。目前我国在量子光学的理论研究方面已有相当的规模并取得不少成果,进行实验研究的条件也逐步具备。在山西大学光电研究所和中国科学院物理研究所建造的挤压态实验研究装置已部分进入调试阶段。中国科学院上海光学精密机械研究所的“神光”系统光强达到了 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 。中国工程物理研究院已利用此装置做成了X射线激光器。另外,中国科学院上海光学精密机械研究所还建立了量子光学开放实验室,接受所外人员申请到该所进行课题研究。可以期望,将有更多的年青人加入到这支年青的队伍中来。

年代以来, 实验室激光聚变取得了举世瞩目的进展, 美国领先, 其次是日本、法国、英国和苏联, 我国也达到了一定水平。1985 年以来, 美国的 ICF 研究发展较快, 它一方面利用世界上最大的钨玻璃激光系统 NOVA 开展了与理论研究密切结合的实验研究; 另一方面, 两个武器研究所(LLNL 和 LANL)执行保密的 Halite-Centurion 计划, 利用地下核试验, 模拟间接驱动, 获得了实现高增益激光聚变的关键数据, 展示了激光聚变可能实现的前景。1988 年 8 月美国公布了这个消息和部分数据, 引起了全世界聚变界的注意。

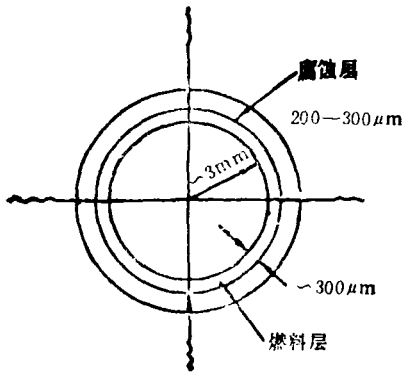


图 1 靶丸示意图

按照驱动源与靶的不同作用方式, 激光聚变可分为直接驱动和间接驱动两种。直接驱动是将多束驱动激光脉冲直接辐照到靶丸上, 其激光强度约为 10^{14} — 10^{15} W/cm², 使靶丸形成一个尽可能均匀的球形内爆压缩过程; 间接驱动则是先将驱动激光脉冲能量转换成软 X 射线能量, 再用后者驱动靶丸的内爆压缩过程, 故间接驱动又称辐射驱动。两种方式各有特点, 目前都受到相当的重视。

一、激光聚变物理过程概述

激光核聚变的物理过程, 大致可分为三个阶段: 激光与靶的耦合(激光被靶吸收或转换为 X 光后被靶吸收); 向内传热增压和聚心压缩; 芯部点火与热核燃烧。现概述如下^[1-3]。

1. 激光与靶的耦合(吸收及 X 光转换)

激光脉冲的前沿或预脉冲照射于靶表面使表面汽化, 在靶四周形成一层稀薄的等离子体, 这一层称作电晕区。在电晕区中, 等离子体频率等于激光频率的地方称为临界面。激光主要就是在临界面附近被吸收的。

激光吸收的主要机制如下。

(1) 逆韧致吸收(古典碰撞吸收)

这是理想的吸收机制。吸收系数的表达式是

$$K_{ib} = \frac{4.97 n_e n_i z^2 g}{n_e^2 \cdot \lambda^2 T_e^{3/2}} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)^{-1/2}, \quad (1)$$

其中 ω_p 和 ω_l 分别为等离子体频率和激光频率, λ_l 为激光波长, T_e 为电子温度。可见逆韧致吸收主要发生在临界面附近, 且对短波长激光 λ_l 和高 z 靶吸收系数较大。此外, 逆韧致吸收正比于 $T_e^{-3/2}$, 所以在电子温度升高时, K_{ib} 变小。因此, 在长波激光作用下和在高功率密度(如 $P > 10^{15}$ W/cm²) 时, 逆韧致吸收变得不重要。我们所不希望的反常吸收过程就会严重影响吸收质量。

(2) 共振吸收

激光的电场与电晕区的密度梯度发生直接相互作用, 产生出电子的等离子体振荡。激光电场的能量被抽运给电子的等离子体振荡。当入射光的电场矢量在密度梯度方向有分量时, 就产生这样的振荡。这种性质的吸收显然发生在临界面附近, 因为那里存在着 ω_l 和 ω_p 之间的共振。

(3) 其他反常吸收机制(参量激发)

可以概括为激光等离子体的多波相互作用过程, 如三波共振。激光(横波)和电子等离子体波(朗缪尔波)及离子声波之间可能有多种共振的方式, 分别诱导产生布里渊散射、拉曼散射、双等离子体波衰变和自生磁场等。它们发生在亚临界区或密度低于四分之一临界密度 n_c 的地方。

激光吸收研究的目的是使大部分激光能量被韧致吸收, 尽量减少反常吸收, 确保不产生太多的(能量大于 10 keV 的)超热电子和快粒子等, 因为它们对靶丸的预热会降低靶丸的效率。

对间接驱动靶,需先将激光能量转换为软 X 射线,再由软 X 射线均匀地照射靶丸。这里,研究的核心问题是激光—X 射线转换效率,其定义为

$$\eta_x = \frac{E_x}{E_a}, \quad (2)$$

式中 E_x 为产生的 X 射线的能量, $E_a = E_l \cdot \eta_a$ 是被吸收的激光能量, η_a 为吸收效率(见图 2)。

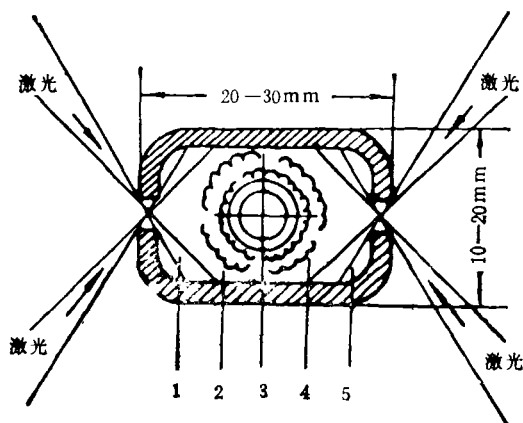


图 2 间接驱动示意图
1,5 为吸收转换区; 2,4 为 X 射线通道;
3 为内爆压缩区

转换效率 η_x 与激光的波长、强度、焦斑尺寸和靶材及转换靶(腔靶)的结构有关。实验已证实:用短波长激光(如 Nd 玻璃激光的 3ω)、适中的强度(约 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$),可获得良好的吸收效果,并可抑制超热电子,吸收效率 η_a 可达 80%。因此,近年来在驱动器的研究中,除三倍频的钕玻璃激光外, KrF 准分子激光器也受到很大重视。

在间接驱动腔靶中,研究激光的吸收,激光向 X 射线的转换, X 射线的输运,以便在靶丸周围创造一个较“干净”且温度分布较均匀的辐射场环境。这是黑洞物理的主要内容。

2. 传热增压和聚心压缩

为了达到压缩热核燃料的目的,首先必须由临界面往高密度烧蚀层传热实现增压。在直接驱动情况下,激光在临界面附近把能量交给电子,然后由电子传热把能量送入靶丸。因此热传导的问题是激光聚变的关键问题之一。这

里的热传导问题比通常的热传导复杂,已证实存在着强自生磁场的阻热作用,还可能存在着反常的阻热因素。

间接驱动靶靠 X 射线传热。X 射线传热速率与 X 射线温度 T_x 关系非常敏感。由于辐射自由程 $l \propto T_x^{-3}$,所以辐射流

$$F = -K \nabla T_x = -\frac{lc}{3} \Delta \sigma T_x^4 \propto T_x^{3-1}. \quad (3)$$

可见, T_x 是间接驱动靶的关键物理量。

传热使靶丸的外壳(推进层)受到烧蚀,壳的炽热气体一部分外爆飞散,一部分被推向内部,聚心加速,使靶丸受到聚心冲击波的压缩。

在这个聚心压缩过程中,有几个至关重要的问题:(1)必须防止推进层与燃料交界面的 Rayleigh-Taylor 界面不稳定性的发展,避免推进层材料与燃料的混合;(2)要控制压缩形状基本保持球形,以免降低压缩度;(3)争取实现冷压缩,防止预热,以达到高压压缩度,为此要抑制超热电子的产生。

为实现以上几点,需要对驱动器和靶进行精心设计,达到高的流体力学效率。它定义为内爆动能与被吸收的驱动能之比,即

$$\eta_h = \frac{\text{燃料获得的能量}}{\text{被吸收的激光能量}}. \quad (4)$$

比较合理的估计为 $\eta_h \sim 15\%$ 。

3. 芯部点火与热核燃烧

经过上面的传热和聚心压缩过程,应使 DT 靶丸的燃料获得大于 10^{12} atm 的压力和大于 5 keV 的温度,DT 才能点火。

可导出如下的 DT 燃耗公式:

$$f_b = \frac{\rho R}{6.3 + \rho R}, \quad (5)$$

其中 ρ , R 分别是经压缩后 DT 燃料的密度和半径。有可能实现的 f_b 大于 30%,即相应的 $\rho R > 3 \text{ g/cm}^2$ (在 ICF 中常用这一判据取代通常的 Lawson 判据)。

可以证明,DT 靶丸的点火不可能是靶丸燃料整体点火,而只能是中心附近一个小区域(其质量约为总燃料百分之几,温度达到 5 keV 以上)首先点火。然后,由 DT 反应产生的 3.5

MeV 的 α 粒子传热, 点热其余部分, 形成热核燃烧。激光聚变的增益定义为

$$G = \frac{\text{DT 聚变放能}}{\text{激光能量}} \quad (6)$$

已有的研究表明, 当激光能量达数 MJ 时, 间接驱动可以实现 $G \sim 100$ 的高增益^[4]。

二、激光聚变与核武器物理

核武器物理的部分问题可在实验室条件下进行研究。由于核试验逐渐受到限制并有可能最终停止, 所以核武器研究的可能发展趋势之一是转入实验室研究。而 ICF 正是热核武器物理问题研究的主要的实验室手段。

实验室微聚变相当于一个微型氢弹爆炸。间接驱动 ICF 中的辐射运输、压缩、爆聚和热核燃烧等物理过程, 以及由它造成的辐射环境在许多方面与热核武器很相似, 因此可以利用激光聚变作为缩小尺度情况下研究核武器物理和武器效应的实验室手段。

有可能利用 ICF 研究的武器物理问题有以下几方面。

1. 核武器物理过程的分解研究

(1) 辐射运输和辐射驱动内爆动力学研究对核武器设计具有重要意义。间接驱动方式的激光聚变在结构原理上与氢弹类似, 不同的只是这里的源区不直接释放辐射能, 而是首先吸收激光能量, 然后将激光能量转换成软 X 射线辐射能。以后的各过程, 从辐射运输过程, 靶丸的内爆压缩过程, 直到次级(靶丸)的热核反应过程, 与氢弹均十分相似。因此, 激光聚变研究的成果, 可以直接或间接地用到核武器的研究发展中去。例如, 如何做到球对称的压缩? 如何实现等熵压缩或控制增熵以提高热核燃料的压缩度? 如何创造使燃料中心点火的条件及燃烧具有什么规律? 存在哪些二维效应以及如何控制流体力学不稳定性等非理想因素的影响等, 都可从 ICF 的研究中得到启示。而且, 由于二者有这样高度的类似, 用于武器设计的大型数值模拟计算程序(一维和多维计算程序)可

以通过 ICF 的研究得到很好的校验。

尽管 ICF 的研究对深入理解武器物理很有帮助, 却不能完全取代核试验。ICF 辐射腔中的驱动温度比较低($\sim 3 \times 10^6 \text{K}$), 核武器中的辐射温度要高得多, 而能量密度 $\propto T_r^4$ (辐射温度), 故二者的物理状态不同。此外, 二者在要求方面也有差异, 武器有许多结构设计上的问题, 如小型化、精确设计等, 要经过核试验检验, 武器的可靠性问题, 需经试验后才能定型。

ICF 物理研究也有比武器物理研究困难的一面。例如, 武器中辐射能量充分, 而激光聚变中由于激光能量有限, 相应的辐射能量不充分, 故必须要求各个过程都有高的效率, 以降低对驱动器的要求。所以, 从某种意义上说, ICF 的物理问题比武器更复杂, 其研究成果有可能对采用新原理的武器研究有所启发。

(2) 核武器设计参数的研究: 通过激光聚变的研究, 有可能获得一系列对武器设计有用的参数。例如, 千万大气压级的物质高压状态方程参数, 几百万度辐射温度下物质的光学不透明度参数等。这些参数的精确化对提高武器设计的水平至关重要。它们难以通过其他手段获取, 但却有可能通过实验室的 ICF 研究获得。

2. 核爆炸效应的研究

实验室 ICF 产生的辐射最接近真实的核爆炸的辐射场, 它包括中子、 γ 射线及硬 X 射线和软 X 射线, 能允许人们反复地研究核爆炸条件下各种射线辐照的综合效应及其对抗措施。

通过实验室 ICF 实验, 可以校准地下核爆炸中使用的各种诊断测量仪器, 从而发展核爆诊断技术, 提高诊断测试水平。利用 ICF 实验产生的高能中子和高能 X 射线, 可以发展中子针孔照相技术和高能 X 射线照相技术。

实验室激光聚变还有可能提供相当强的硬 X 射线, 从而成为 X 射线激光研究的泵浦源。输出 10^3MJ 聚变能的高增益靶丸, 产生的硬 X 射线功率密度有可能达到 $10^{16} - 10^{17} \text{W/cm}^2$, 已接近核爆炸泵浦 X 射线激光的泵浦源的水平, 可以成为在实验室实现短波长 X 射线激光的有力

工具。

三、我国的激光聚变研究

70年代末,在王淦昌教授等著名科学家倡导下,中国工程物理研究院就着手激光聚变研究实验室的筹建工作。经过十多年的努力,在器件、诊断、理论、制靶和实验诸方面都取得了举世瞩目的进展,形成了我国自己的研究体系,并且造就了一支实力雄厚的科技队伍。

1. 器件

激光聚变研究带动了我国高功率钕玻璃激光技术的发展。根据中国工程物理研究院的需要,中国科学院上海光学精密机械研究所于1984年和1986年先后研制成功了LF-11($1.06\ \mu\text{m}$, 70J, 0.3—0.8ns)和LF-12($1.053\ \mu\text{m}$, $2 \times 800\text{J}$, 0.1~1.0ns)两台激光器。LF-11激光器经中国工程物理研究院改进提高,已成为我国目前唯一的一台高功率倍频激光器($0.53\ \mu\text{m}$)。该激光器承担着大量的激光等离子体相互作用的基础实验研究工作,几年来打靶五千余发,取得了一大批实验数据。LF-12(神光)装置,就其主要技术指标——能量而言,已达到国际中等水平。它主要承担综合性总体实验,在该激光器上成功地进行了黑洞物理和直接与间接驱动出中子的实验等。

2. 诊断

激光器提供了产生等离子体的手段,而认识等离子体的特征则需发展相应的诊断技术和设备。激光聚变等离子体有其自己的特点,其空间尺度很小(几个 μm 到几百个 μm),时间过程极短(ps—ns),被测对象复杂,包括具有一定能谱的离子、电子、中子、X射线和各种非线性过程产生的散射光等。中国工程物理研究院发展了高时空分辨、单次脉冲、快速记录和具有抗干扰能力的数十种百余道诊断仪器,并建立了一些标定源。其整体规模和性能已达到国际偏上水平,即使在世界著名实验室中也是不多见的。对诊断技术和设备不断提出的各种新需求,已经促进并在一定程度上支持了我国某些

物理

高技术的发展,如ps分辨高速条纹相机技术和X射线光学技术等^[9]。

3. 理论

研究激光聚变这种复杂过程,理论分析和数值模拟(计算机实验)与物理实验一样,是必不可少的一个方面。中国工程物理研究院利用激光聚变与核武器物理过程的相似性,发展了大型程序,利用计算机对激光吸收、X射线转换、辐射输运等黑洞物理和内爆动力学过程进行模拟,既对实验结果进行系统分析,加深对物理规律的认识,又可预言和优化实验条件,为实验提供充分依据。

4. 制靶

激光聚变实验所用的靶子,尺寸小(仅数百微米),结构复杂,精度高,种类多(平面靶、孔靶、空腔靶、直接驱动靶和间接驱动靶等),制备过程涉及多种学科和技术,难度很大。中国工程物理研究院逐步建立起微加工实验室,配置了必要的加工设备和检测装置,摸索并形成了整套制靶工艺,研制出大量体现一定物理思想的精巧的靶子,满足了历年实验的需要。

5. 实验

多年来,中国工程物理研究院在LF-11激光器上进行了大量的平面靶实验和黑洞靶的分解实验,系统地研究了不同激光参数脉冲与金靶的相互作用,测定了亚千X射线谱、转换效率以及超热电子的特性。为使激光束有效地注入腔靶,在平面孔靶上进行了不同条件下的等离子体堵口研究。这些基础物理实验为在LF-12激光器上进行总体实验打下了可靠的基础,并为检验理论计算提供了依据。1986年以来,在LF-12激光器上进行的四轮黑洞物理和直接与间接驱动出中子实验,取得了可喜的成果。

(1) 直接驱动

1986年在LF-12(神光)装置上,做了两路直接驱动打DT气靶丸实验,每路50—100J,脉宽80—105ps, D与T的混合比为2:1,玻璃气球直径80—106 μm ,壁厚0.7 μm ,气压10atm,记录到中子产额为 5×10^6 。

(2) 黑洞物理

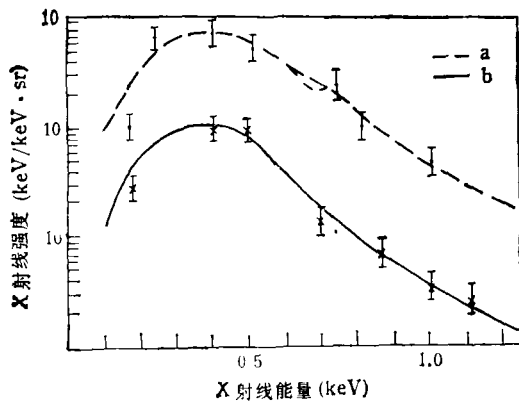


图3 黑洞靶的亚千X光谱
a 为激光入口内的X射线； b 为诊断孔内的X射线

在间接驱动研究方面，首先开展了黑洞物理基础研究，进行了激光吸收和X射线转换的

实验，诊断了等离子体特性、高能电子和X射线的分布，用X射线针孔相机与条纹相机进行了时间分辨的测量。结果表明，黑洞靶的吸收激光效率 η_a 可达80%（而同样功率密度下的金平面靶的 η_a 只有40%）。由于腔靶对等离子体的约束，黑洞靶中的X光转换效率也比平面靶时高得多，约达被吸收能量的40—50%。

转换得到的软（亚 keV）X射线是驱动靶丸的能量。我们利用入射孔和诊断孔来测量软X射线，看到后者很接近黑体谱（图3）。入射激光转换成X射线的区域的信息由入射孔量得的辐射温度给出，后者的平均值为155eV，而由诊断孔量得的是靶丸放置区的辐射温度，其值为130eV，达到了理论预期结果。这为下一步进行辐射驱动出中子实验打下了良好基础。

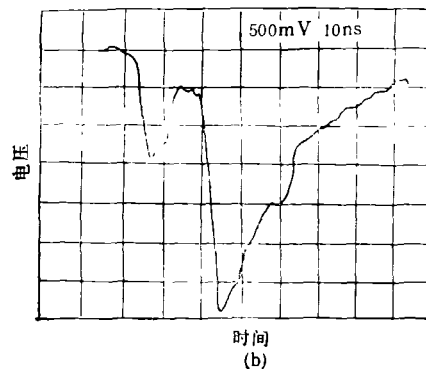
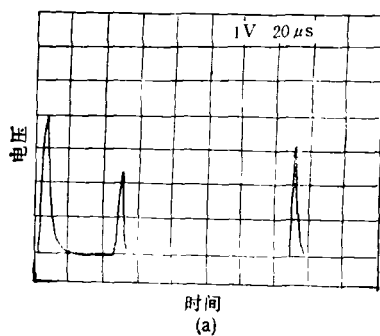


图4 实验测到的典型聚变中子信号波形
(a) 慢法探头信号仿；(b) 快法探头信号

(3) 间接驱动出中子实验

1990年10月，在LF-12装置上以两束激光对打方式进行。每路激光能量为600—700J，脉宽为0.6—0.8ns，实验采取措施避免了散射激光和快粒子的干扰，得到了间接驱动出单发中子 10^4 个。还进行了激光斜入射腔内壁的混合型驱动（即激光与辐射共同驱动）实验，记录到单发中子 10^3 个，由记录到的中子波形与X射线波形的峰间时间差证实（图4），得到的中子为14.1MeV的聚变中子。这次实验使我们更深刻地体会到：创造一个“干净”的辐射环境是间接驱动实验成功的重要条件。在“神光”这样的小装置上获得上述结果，在国际上也是难得的。它表明了我国进行实验、理论、器件、诊

断及制靶互相配合的整体研究的能力，标志着我国激光聚变的研究工作迈上了一个新的台阶。

作者感谢于敏、胡仁宇研究员对本文所提的宝贵意见。

- [1] J. Duderstadt and G. Moses, *Inertial Confinement Fusion*, A Wiley-Interscience Publication, (1982), 29—62.
- [2] 常铁强等, 强激光与粒子束, 1-3(1989), 195—209.
- [3] 杜祥瑞, 核物理动态, 6-1(1989), 34—37.
- [4] E. Storm et al., paper on the 8th Session of the International seminars on Nuclear War, Erice, Italy, (1988).
- [5] 胡仁宇, 郑志坚, 强激光与粒子束, 2-1(1990), 1—15.