

# 激光聚变研究中的一些物理问题

常 铁 强

(能源部北京应用物理与计算数学研究所)

惯性约束聚变(ICF)是不同于磁约束聚变的另一种实现可控热核反应的方式,作为未来的能源有着光明的前景。目前研究最多的是激光引起的聚变。高功率激光可以在物质中产生千万大气压级的高压,能用于研究高压物理,激光产生的X光可用于研究辐射物理和作为高亮度的X光源。近年来,激光更用于在实验室中产生X光激光。激光与等离子体的相互作用是激光聚变研究的基础,数值模拟则是ICF研究中不可缺少的手段。

## 一、激光聚变

轻的原子核相互碰撞时,有一定的概率发生聚变反应,生成更重的元素,同时释放出剩余的结合能。最易于发生的聚变反应是氢的两种同位素氘(D)和氚(T)之间的反应,生成 $\alpha$ 粒子和中子,放出17.6MeV的能量。将这一部分能量用于发电,几十年来一直是科学家们追求的理想。实现聚变反应的条件是:(1)温度要高(使DT粒子具有足够的动能,以克服存在于他们之间的库仑势垒,增大热核反应的概率);(2)反应燃料密度要大;(3)反应时间要长。这种可控热核反应除了磁约束聚变方式外,惯性约束聚变是另一种很有前途的方式。ICF的主要想法是:高功率驱动源均匀照射内部充有DT物质的微型球靶(毫米量级大小),通过推进层的内爆过程将DT燃料压缩到很高的密度(例如 $\sim 200\text{g}/\text{cm}^3$ ),同时在压缩过程中至少一部分热核燃料达到相当高的温度( $\geq 5\text{keV}$ ),首先发生聚变反应并逐渐点燃其他DT物质,而由推进层和DT物质本身的惯性维持持续反应所需要的时间。和磁约束聚变比较,惯性约束聚变要求DT达到的密度要高得多,持续时间却短得多(毫微秒量级)。ICF的驱动源可以是离子束或者是激光,其必要条件是提供大于 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 的能流密度。目前研究得最多、发展最快的是激光聚变。

高能流密度激光打在靶上,一部分能量会被吸收,形成高温( $\sim \text{keV}$ )等离子体向外喷

射,同时有一个很强的冲击波向靶内传播。如果靶物质是高Z元素,那么还能产生很多X射线。正因为激光可以转化为不同形式的能量,所以发展了几种不同的激光聚变驱动方式。直接驱动方式是将激光束直接打在靶的外壳,利用上述的激光烧蚀机制产生的高压冲击波驱动内爆;间接驱动方式(又称为辐射驱动)是利用激光转换产生的X光能量,这里软X射线是聚变的直接驱动者。还存在着另一种可能的方式,那就是直接利用激光产生的高温等离子体的能量。当前研究很多的主要是前两种方式。无论采用何种方式,最终是要压缩充满DT热核燃料的靶丸达到需要的密度。目前公认的反应方式是:一小部分DT首先在球心部分点火,反应产生的 $\alpha$ 粒子具有很高的动能,在其射程内加热心部周围较冷的燃料,使之燃烧,最后达到可观的燃耗。关键的技术之一是高度球对称的内爆压缩。对于直接驱动方式,达到球对称内爆需要几十路相同的激光束同步辐照靶丸,做到尽可能的均匀辐照(涨落要小于1—2%)。然而,实际上这样还不够,因为激光在等离子体中能产生自聚焦而导致随机的小尺度的(微米量级)空间能量密度涨落,辐照均匀成为一个相当困难的问题。近年来,这方面的研究取得了重要的进展,方法是减弱激光的相干性,抑制激光和等离子体相互作用中的不稳定性<sup>[1,2]</sup>。实验证明,采用短波长、宽频带(减少时间相干)激光ISI(induced spatial incoherence)技术,可大大地改善激光辐照靶的均匀

性。至于辐射驱动方式，它的主要优越性就在于辐照可以很均匀，因为辐射输运速度很快。两种方式都取得了很好的进展，其中辐射驱动取得的进展更快，实验证实 DT 小球对称内爆半径收缩比已接近或超过 30。

作为干净能源用的反应堆所需要的靶是高能量增益靶（能量增益定义为  $G = \text{热核燃料释放能}/\text{激光能}$ ）， $G \geq 100$ 。高增益靶所需要的激光能量大约是几到十百万焦耳。目前世界上最大的激光器是 NOVA 装置（美国，LLNL），共分十路，总共能提供能量约为 100kJ 的 1.06  $\mu\text{m}$  波长的激光（Nd 玻璃激光），经过频率转换，可以输出  $\sim 20\text{kJ}$  的 0.35  $\mu\text{m}$  的激光。NOVA 装置主要用于研究辐射驱动靶，已取得了很好的进展。其次是 GEKKO XII 装置（日本，ILE），有 12 路，可提供能量为 40kJ、波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的激光。这些激光器虽然不能用来达到高增益，但是可以研究激光聚变物理。我国的 2kJ 两路激光装置也可用于激光聚变物理等方面的初步研究。近年来，激光聚变（特别是辐射驱动方式）的研究已经弄清楚了高增益靶的条件。这些条件归结起来就是：（1）高的激光吸收效率和高的 X 光转换效率。为此必须采用波长小于 0.35  $\mu\text{m}$  的激光。这种激光打 Au 靶的吸收效率可以大约达到 90%，其中的 70% 以上可以转换为软 X 光。如果使用三次谐波光，则还能有效地抑制几十 keV 的超热电子的产生，这种电子能够引起靶球预热，导致高密度压缩的失败。（2）流体力学效率（定义为靶丸吸收的能量交给 DT 燃料的份额）应达到 10%，DT 的燃耗则要达到 30%。（3）靶的 DT 装量为几毫克（ $\sim 5\text{mg}$ ），若要求达到  $\sim 200\text{g}/\text{cm}^3$  的高密度，则必须是高度球对称内爆，同时是低熵压缩，中心点火。

## 二、激光高压物理

激光产生的高压冲击波可以用来研究高压下物质的性质，例如研究状态方程。

激光产生的压力近似地满足定标关系

$$P \propto I^{2/3} \lambda^{-1/3},$$

这里  $I$  是激光能流密度， $\lambda$  是激光波长，比例系数和靶物质有关。对于  $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$  能流密度的 1.06  $\mu\text{m}$  激光，可以产生千万大气压。

实验上测量冲击波产生的压力常常是通过测量冲击波在物质中传播的速度而得到，因为

$$P \propto D^2.$$

测量冲击波速度  $D$  的办法是采用阶梯靶，测量激波到达不同阶梯平面的时间， $D \sim \Delta x / \Delta t$ ， $\Delta x$  是阶梯的厚度。因此，就要求激光产生的冲击波在比  $\Delta t$  长得多的时间内是稳定的。理论和数值模拟都指出对于脉冲宽度为  $\tau$  的高斯形激光，稳定后的压力值可以维持  $\sim 2\tau$  的时间间隔，因此要求激光具有较宽的脉冲宽度。

为使激波测量达到较高的精度，要求激波前沿要陡，越接近理想，激波越好。但是，实际上常常存在着超热电子引起的激波前加热，特别是在长波长激光情况下。超热电子是由激光和等离子体相互作用引起的某些不稳定性过程产生的。这些电子的能量比热电子高得多，因而具有很强的穿透能力造成激波前的预热。为了防止超热电子预热，经常在靶中夹一层适当厚度的高 Z 元素物质。

影响激波测量的另一个重要问题，是要求在波阵面上激波强度尽量均匀。这就要求激光打在靶上的光斑适当地大，而且在光斑内的辐照强度要很均匀。近年来，辐照均匀技术有所发展，这是有利条件。我国从实验上和理论上都在研究这一问题，去相干技术的使用得到了较好的效果<sup>[5]</sup>。

## 三、激光腔靶物理

激光和平面靶的相互作用已经研究得很多了。但是，实际的激光聚变靶要复杂得多，特别是间接驱动靶。间接驱动靶可以有各种不同的设计，但是有一点是共同的，那就是都有一个腔。这个腔由高 Z 材料制成，壁上有几个洞让激光进入其中。激光和腔中的等离子体耦合，经多次吸收、散射过程而被吸收，并部分地转换为 X 光，然后压缩 DT 靶球。

一个值得研究的问题是，激光和腔靶是如

何耦合的，腔靶和平面靶在激光和靶耦合物理上有什么不同。腔靶物理的研究对于较长波长激光更有意义，因为那时腔靶将可能改善激光和靶的耦合，即提高激光的吸收效率和X光转换效率。实际的腔靶物理是非常复杂的，因为存在着二维效应，一部分激光产生的等离子体和辐射都会从激光入射孔流出腔外。本文的目的是揭示激光腔靶物理的主要特征。我们研究了较为理想的腔靶，其二维效应较小，这种靶和平面靶之间的差别更为清楚。我们对激光腔靶和平面靶进行了理论分析和数值模拟，它们的基本特点和差别列于表1。

表1 激光理想腔靶和平面靶的基本特点  
(Au, 1.06 μm 激光)

	理想腔靶	平面靶
等离子体	空间分布相对均匀, 密度高	密度指数减小 $\rho \sim \rho_c \exp[-x/l]$
激光吸收	吸收高, 接近体吸收	吸收低, 基本上是临界界面处吸收
能量分配	热能是主要的, 解体之前动能小	热能~3/8 动能~5/8
X光转换	高	低(30-40%)

腔靶的激光吸收效率可以大大提高，例如可达到70%，比平面靶大一倍（用1.06 μm激光）。这是因为腔中等离子体密度增加了（如果小于临界密度），同时也是因为激光在腔中经历了多次吸收-散射过程，结果和激光耦合的等离子体量增加了。理想腔靶的激光X光转换效率可能比平面靶的提高一倍。原因是：理想腔靶中等离子体的能量主要是热能，在解体之前动能很小；而平面靶则相反，被吸收的激光能量大部分变为等离子体动能。热能可以转换为X射线能量。这两种靶差别的根本原因是：和平面靶不同，腔靶中等离子体可以占据的空间小，因而等离子体的密度和压力在腔中较高，这就阻止了腔内壁烧蚀产生的等离子体向内运动，从而减少了动能。

在平面靶的情况下，转换产生的X光可以

进入自由空间。但是，腔靶的情况不同，大部分的辐射能量将流入腔壁而重新被靶吸收，而且主要是被靶内壁中较冷的部分吸收，加热了这部分介质，小部分辐射能可以从激光入射孔逃出体系。由于腔壁物质比热比较大，平均辐射温度比热等离子体温度低得多。

腔靶实验结果表明，激光在腔靶中的吸收效率的提高和理论预言一致，X光转换效率也比平面靶有所提高，但是由于实际靶的二维效应不可忽略，所以它不是完全的理想腔靶。实验表明的另一重要特点是腔靶的超热电子等效温度比平面靶高得多（对1.06 μm激光），可以达到40—50 keV，而平面靶在相同的激光条件下只有几到十几 keV。一个重要的原因是腔靶中等离子体密度梯度相对小，从而提高了受激拉曼散射水平。此外，腔靶中等离子体和激光耦合的数量的增加，也使产生超热电子的机会增加。

#### 四、计算物理

ICF 研究取得很大进展的主要原因一方面是由于越来越大的激光器相继投入使用，开展了大量的实验研究；另一方面数值模拟一直起着非常重要的作用，特别在深入了解激光聚变物理方面。反过来，激光聚变的研究也促进了计算物理的研究。数值模拟对ICF研究的重要性是由本身的特点决定的。首先，ICF靶很小，现在是亚毫米量级，高增益靶最多是厘米大小，而激光脉冲却很短（毫微秒），结果激光能流密度很高，因而很多物理过程必须进行非局部热力学平衡的描述；其次，激光聚变靶虽然很小，结构却很复杂，经常需要二维甚至三维的描述；第三，ICF物理过程十分复杂，要弄清楚其物理过程必须有细致的数值模拟。

一个满意的激光聚变数值模拟应该包括下列方程：

1. 激光在等离子体中的传播、吸收方程；
2. 电子、离子温度分离的流体力学方程；
3. 非局部热力学平衡的电离和束缚电子占据概率方程组；
4. 辐射输运方程；
5. 超热电子输运，能量

沉积和其自洽电磁场方程; 6. 物质状态方程; 7. 热核反应率方程及带电粒子、中子输运方程。

此外, 还需要等离子体诊断和专门研究激光和等离子体相互作用的数值模拟手段。因此, 研究激光聚变的各大实验室都编制了很多专门研究的程序, 最著名的是美国的二维 LASNEX 程序。能源部北京应用物理和计算数学所也编制了一系列大型数值模拟程序研究这一问题。发展程序的同时也发展了一些计算数学方法和计算物理方法, 例如解超热电子多群扩散方程和自洽电场的有效方法, 求解束缚电子占据概率方程组的多时标微扰论方法<sup>[4,5]</sup> 和处理辐射输运问题的一些方法等<sup>[6]</sup>。

### 五、其他相关的物理问题

和激光聚变密切相关的研究首先是激光等离子体相互作用和等离子体物理。我们研究了等离子体集体效应对激光逆韧致吸收的影响<sup>[7,8]</sup>, 激光在临界面附近的参量不稳定性<sup>[9,10]</sup>,

离子声湍流、受激喇曼散射以及超热电子的产生等。激光产生的 X 光可用于研究辐射物理, 例如辐射和物质的相互作用、辐射在物质中的传播等, 激光产生的 X 光还可以作为高亮度 X 光源, 用于多种科学研究。近年来, 激光更多地用于在实验室中产生 X 光激光, 这方面研究发展很快。

- [1] R.H. Lehberg et al., *Opt. Commun.*, **46-1** (1983), 27.
- [2] Y. Kato et al., *Appl. Physics*, **B29**(1982), 186.
- [3] 顾援等, *物理学报*, **37-10**(1988), 1690.
- [4] 常铁强, *物理学报*, **34-4**(1985), 528.
- [5] Chang Tieqiang et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A255** (1987), 262.
- [6] Chang Tieqiang et al., *Laser Internation and Related Plasma Phenomena*, eds. Heinrich Hora and George H. Miley, Plenum Press, New York, vol. 8, (1988), 193.
- [7] 常铁强, *物理学报*, **31-9**(1982), 1152.
- [8] 常铁强等, *物理学报*, **33-4**(1984), 1437.
- [9] 刘成海等, *计算物理*, **2-4**(1985), 454.
- [10] 张家泰等, *计算物理*, **3-3**(1986), 322.

(上接第 10 页)

的交换积分常数  $\alpha$  和  $\beta$ 。过去的实验是在低组分下进行的。最近, 在较大组分范围内分别对  $\cdot\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0.69 \leq x \leq 0.73$ )<sup>[11]</sup> 和  $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $0.25 \leq x \leq 0.71$ )<sup>[12]</sup> 进行测量的结果发现, 当组分增加时,  $\alpha$ - $\beta$  强烈下降。这说明, 或是磁离子与载流子的交换积分常数随晶体组分而变化, 或是平均场理论对高浓度区不再适用。这一进展有待进一步研究。

SMSC 材料是唯一的可在同一晶体结构的很宽范围内通过改变其组分就可研究从顺磁-自旋玻璃-反铁磁态的材料。SMSC 中集团的形成依赖于磁离子组分, 随着组分浓度的增大而增强。当磁离子处于高浓度时, SMSC 中形成具有反铁磁序的磁离子集团。由于我们对  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ ,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  和  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  等 SMSC 的能带结构变化已有较详细的了解, 这些材料可作为我们进一步深入研究具有在很宽范围可变能谱参数的半导体磁性的基础。

SMSC 材料也是研究固体的无序体系及其形成自旋玻璃态、集团玻璃态和混磁态等特有性质的很好的对象。

目前国际上在对含  $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{++}$  等过渡族金属顺磁离子的 SMSC 深入研究的同时, 正进一步探索新的领域, 如四元化合物  $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Te}$  和  $\text{Pb}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Mn}_y\text{Se}$  等, 以及含稀土离子 (4f 态电子) 的  $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$  和  $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$  等, 它们可望成为长波红外激光器和探测器的很好的材料。

- [1] 陈辰嘉, *物理*, **17**(1988), 462.
- [2] Shoichi Nagata et al., *Phys. Rev.*, **B 22**(1980), 3331.
- [3] R. R. Galazka et al., *Phys. Rev.*, **B 22** (1980), 3344.
- [4] J. A. Gaj et al., *Solid State Commun.*, **29**(1979), 435.
- [5] M. A. Novak et al., *Phys. Rev.*, **B 33**(1986), 6392.
- [6] S. B. Oseroff et al., *Solid State Commun.*, **35**(1980), 539.
- [7] 陈辰嘉等, *红外研究*, **7**(1988), 419.
- [8] H. Kett et al., *J. Magn. magn. Mater.*, **25**(1981), 215.
- [9] S. Venugopalan et al., *Phys. Rev.*, **B 25**(1982), 2681.
- [10] S. B. Oseroff, *Phys. Rev.*, **B 25**(1982), 6584.
- [11] J. P. Lascaray et al., *Phys. Rev.*, **B 35**(1987), 675.
- [12] J. P. Lascaray et al., *Phys. Rev.*, **B 38**(1988), 7602.