

激光核聚变物理概述

杜祥琬

(北京应用物理与计算数学研究所)

一、引言

核聚变研究的最终目的是为人类提供未来的能源。氢弹是以不可控的形式显示了核聚变能的威力。人们正在做出巨大努力,去实现可控的核聚变。目前,核聚变反应堆的研究正处在实现高增益的前夜。虽然有不少困难,但前景光明。

核聚变的研究主要有两条技术途径,一条是磁约束聚变;另一条是惯性约束聚变。

惯性约束聚变是利用高功率的脉冲能束均匀照射微型聚变靶丸,由靶面物质的熔化喷溅产生的反冲力(惯性力),使靶内的聚变物质受到约束,迅速被压缩至高密度(液态氘氚密度的1000倍左右)和热核燃烧必须的高温(1亿摄氏度左右),从而发生微型热核爆炸,释放聚变能。

高功率脉冲能束又称驱动器。它可分为两类:(1)聚焦的强激光束;(2)聚焦的强流离子束(包括轻离子束和重离子束)。我们将主要讨论激光聚变。

按着驱动器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。

激光聚变可能有两方面的应用:(1)民用:用于发电,还可利用其产生的中子制造裂变材料,生产放射性同位素等;(2)军用:在实验室中模拟核爆,促进核武器的发展。这包括:a.研究武器物理,校验核武器计算方法;b.研究核爆辐射效应及其对抗措施;c.做实验室X射线激光的泵浦源。

二、激光聚变的物理过程

激光核聚变的物理过程,大致可分为三个阶段:1.激光与靶的耦合(激光被靶吸收或转换为x光);2.向内传热增压和聚心压缩;3.芯部点火与热核燃烧。现概述如下:

1.激光与靶的耦合(吸收及x光转换)

激光脉冲的前沿或予脉冲,照射于靶丸表面使表面汽化;在靶四周形成一层稀薄的等离子体,这一层称作电晕区。电晕区中等离子频率等于激光频率的地方称作临界面。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有:

•逆韧致吸收(古典碰撞吸收),这时激光功率密度 P 随 X 的变化是:

$$\frac{dP}{dX} = -K_{ib}P \quad (1)$$

吸收系数

$$K_{ib} = \frac{4.97\eta_e\eta_i z^2 g}{n_e n_i T_e^{3/2}} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_L^2}\right)^{-1/2} C_m^{-1} \quad (2)$$

可见逆韧致吸收主要发生在临界面附近,且对短波长 λ_i 和高 Z 靶,韧致吸收较大;此外,逆韧致吸收 $\propto T_e^{-3/2}$,所以在电子温度升高时, K_{ib} 变小,因此,对高功率密度,如 $P > 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 时,逆韧致吸收变得不重要。

•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于电子的等离子体振荡。当入射光的电场矢量在密度方向有分量时,就产生这样的振荡。电荷密度的涨落是

$$\vec{n} = \vec{X}_{os} \nabla n_e \quad (3)$$

$$\vec{X}_{os} = \left[\frac{-e \vec{E}}{m_e \omega_L^2} \right] \cos \omega_L t_0 \quad (4)$$

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。

•其它反常吸收机制：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，分别成为诱导布里渊散射、诱导喇曼散射、双等离子体波衰变等。他们发生在临界面附近或密度稍低于 n_c 的地方。

既然激光吸收主要发生在临界面附近，所以人们十分重视临界面处物理状态的研究。这里，高频场的有质动力势起着重要的作用，它是孤粒子产生的原因，而后者的形成、传播、变化决定了临界面的物理状态。

激光吸收研究的目的是使大部分激光能量被靶吸收，而又不产生太多的超热电子($> 10\text{keV}$)，后者对靶的予热会降低靶的效率。

对间接驱动靶，需先将激光能量转换为软X光，再由软X光均匀地辐照靶丸。这里研究的核心是激光—X光转换效率，其定义为：

$$\eta_x = \frac{E_x}{E_{abs}} \quad (5)$$

$E_{abs} = E_L \cdot \eta_o$ 。转换效率与激光波长、强度、焦斑尺寸和靶材及转换靶(腔靶)的结构有关。

实验已经证实：用短波长激光(如Na玻璃激光的 2ω , 3ω)、适中的强度($\sim 10\text{W}/\text{cm}^2$)和较长的脉宽。(0.1—100ns)，可获得良好的吸收效果，并可抑制超热电子，吸收系数 η_o 可达80%，同时，用短波长(0.35μ)激光，照射全靶，在功率密度 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 时， η_x 可达70%。

2. 传热增压和聚心压缩

为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。激

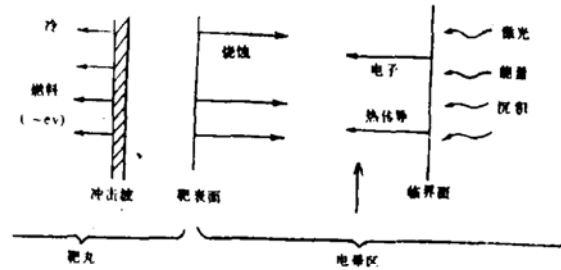
光在临界面附近把能量交给电子，然后由电子传热把能量送入靶丸。因此热传导的问题是激光聚变的关键问题之一。这里热传导问题比正常的热传导复杂。已证实存在着强自生磁场的阻热作用，还可能存在着电子与离子声波湍流反常碰撞的阻热因素。

间接驱动靶是靠X光传热。X光传热速率与X光温度T关系非常敏感。因为辐射流

$$F = -K \nabla T_x = -\frac{1}{3} \frac{c}{3} \nabla Q T_x^4 \propto T_x^{5-7} \quad (6)$$

(因辐射自由程 $\propto T^2$)。可见 T_x 是同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(见如下示意图)：



在这个聚心压缩过程中，有几个至关重要的问题：

- 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，降低燃料效率。
- 要控制压缩形状不大偏离球形，以免降低压缩度。
- 要保持燃料的高压缩度，就要争取实现冷压缩，防止予热，所以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，达到尽可能好的流体力学效率，后者定义为内爆动能与被吸收的驱动能之比，即

$$\eta_u = \frac{\text{燃料获得的能量}}{\text{被吸收的激光能量}} \quad (7)$$

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 $>10^{12}$ 大气压的压力和 $>5\text{keV}$ 的温度，DT才能点火。

对激光聚变，可导出如下的DT燃耗公式：

$$f_b = \frac{\rho R}{6.3 + \rho R} \quad (8)$$

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 约为 $>30\%$ ，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整个靶丸燃料整体同时点火，而只能是中心附近一个小区域（其质量约为总燃料的百分之几）达到 5keV 以上，首先点火。然后，由DT反应产生的 3.5MeV 的 α 粒子传热，点燃其余部分，形成热核燃烧。

还可以从 ρR 判据出发，估计对驱动器能量的要求，由

$$\rho R = \left(\frac{3\rho^2 \sigma^2}{4T} M \right)^{1/3} \quad (9)$$

其中， M 为DT装量， σ 为压缩比；而驱动激光能

$$E_L = \frac{MC_V T}{\eta_a \eta_n} \propto M \quad (10)$$

故；为了降低对 E_L 的要求， M 不能大，则由(9)式，要求 σ 大，适当的估计是 $\sigma = 1000$ （液态DT的1000倍），则由 $\rho R = 3$ 和(9)式得出 $M = 3\text{mg}$ ，又经过冲击压缩和等熵压缩后的燃料温度可估计为 1keV ，则由(10)估出， E_L 约为 3MJ 的量级。

三、现状与展望

目前美国在ICF上每年保持1.55亿美元的稳定投资，主要工作在三大武器实验室（LLNL，LANL，SNL），其次是Rochester

大学，NRL和KMSF。重点进行间接驱动技术研究，同时开展小规模直接驱动研究。

主要研究手段有：

1. 高功率激光器，首先是LLNL的Nova激光器，其水平是：

| 功率 | 波长 |
|-----------|--------------------------|
| 100TW | 1.05 μm |
| 40—60TW | 0.53, 0.35 μm |
| 能量 | 波长 |
| 120—150kJ | 1.05 μm |
| 50—80kJ | 0.53, 0.35 μm |

正准备利用它，作“流体力学等当缩小型靶”研究。苏、日、西欧也在发展大激光器。

八十年代以来，苏联为激光核聚变研究发展了钕玻璃激光器“海豚”系列。能量从 3kJ 发展到 50kJ ，功率从 1.5TW 发展到数十 TW 。据悉，目前正着手建造 1MJ 的装置，并注意提高激光器的效率和重复频率。

美国直接驱动靶的研究在UR和NRL进行。有24路的 ω 激光器。此外，KrF激光器也是一种有希望的驱动器。正在LANL发展，目前水平是单路 10J 不需倍频，但必须作时间调制，压缩脉宽。

2. 利用地下核试验提供的强X光源，作ICF小囊内爆动力学研究。保密的Halite—Centurion计划估计就是作这项研究的。

间接驱动和直接驱动靶均取得了初步实验结果。前者中子产额为 5×10^{10} ，后者达 2×10^{13} 。而且与理论计算符合得不错。

间接驱动靶的黑洞物理的研究，证实了理论预期的结果。如辐射输运、超热电子产生等。黑洞的温度已接近高增益靶设计的要求。

制靶技术取得进展。如制造冷冻DT靶，可降低高增益靶的增熵；又如制作高精度的DT球壳技术等。

一些水平很高的理论计算程序已发展起来并得到了应用。这里需要很多原子(离子)的微观数据。

1988年8月，美国LLNL的E. Storm等在

意大利一次国际会议上透露:

“美国利用地下核爆炸产生的X射线来模拟未来强激光所驱动的DT靶丸聚变,获得成功”。使用的X射线能量为5—10MJ,DT聚变的结果与理论计算相符。达到了接近一维的理想压缩和燃烧。这表明,用Nova的实验结果核验过的理论计算作的外推是正确的,只要建造10MJ的激光器(称Athena),就能实现内爆高压压缩和显著聚变(能耗达~30%)。“上述结果使我们确信:10MJ、三倍频钕玻璃激光器驱动的ICF是可行的,效费比是高的,美国将加速实现这个计划。”

这一情况值得我们注意。

我国也开始了激光聚变的研究工作。在激光器的研制、理论模拟计算、制靶、打靶实验与诊断等方面,都取得了初步结果。

实现惯性约束聚变还有很长的路要走。但似乎没有不可克服的障碍会阻止它实际用

于发电。

参考文献

1. 于敏:关于激光聚变研究工作现状(1978)
2. 于敏:惯性约束聚变的展望(1987)
3. J. Duderstadt and G. Moses, Inertial Confinement Fusion, 1982
4. T.H. Johanson, 惯性约束聚变—回顾与展望, 1984. 黄世明译
5. E. Storm, Progress of Inertial Confinement Fusion at LLNL, IAEA 11th Conference on plasma physics and Controlled Nuclear fusion Research, Kyoto, Japan, 13-20, Nov, 1985
6. Review of the department of Energy's ICF Program, March 1986, NAS, Washington D.C.
7. E. Storm et.al, Progress in Laboratory High gain ICF, Prospects for The future. VCRL-preprint, 1988

第七次全国核物理会议在宁举行

由中国核物理学会召开、南京大学和江苏省核学会具体筹备的第七次全国核物理会议暨第二次全国会员代表大会,一九八八年十月二十日至二十四日在南京顺利举行。

出席这次大会的有老前辈程开甲同志,有来自全国科教战线的核物理工作者、研究生及各地的会员代表,还有美国洛斯·阿拉莫斯实验室徐小桦博士和加拿大麦吉尔大学李克平博士,共计二百八十六人。

中国物理学会和中国核学会委派代表出席了会议。

南京大学曲钦岳校长和江苏省科协党组潘恕书记出席了开幕式并发表了热情的讲话。

学会杨立铭理事长和姜承烈秘书长作了学会工作报告。

会上口头交流学术报告137篇,其中大会特邀20篇、分会特邀34篇;核理论46篇,实验51篇,核技术应用40篇。大字报交流

190篇。

这些学术报告交流了我国核物理界自一九八四年第六次核物理会议以来取得的成果,并对国内外的核物理研究进展、动向作了介绍。报告表明,四年来我国核物理工作的水平又有新的提高,达到国际水平的成果越来越多,有不少已取得一定的效益,我国核物理界又为我国科学技术的发展和国民经济建设作出了新的贡献。

会议决定对学会章程作个别修改。一是放宽入会条件,允许硕士毕业生参加工作后,大学本科毕业工作三年、大专毕业工作五年,工作表现好的同志申请入会。二是今后每三年召开一次全国核物理会议,同时召开全国会员代表大会,改选理事会和常务理事。会上确定第八次全国核物理会议一九九一年在西安举行,由西北核技术研究所筹备。

会议期间选举产生了新的理事会和常务