

激光核聚变简介*

物理研究所—0—组

(中国科学院)

国际上已有二十年研究历史的可控热核反应研究工作,近几年来又显得活跃起来。除了它解决人类能源问题的诱人前景以外,这也和最近准稳态环形等离子体装置(如苏联托卡马克[Токамок]装置)及激光产生核聚变的进展相联系。轻原子核(如氘、氚)的聚变反应单位质量反应物质所放出的能量,比重原子核(如铀、钚)裂变反应单位质量所放出的能量还要大,而其原料氘可以从水中大量提取。每升海水中大约含有0.03克氘,经过充分的聚变反应可以产生 $2.4-10.5 \times 10^9$ 焦耳的能量。形象地说,一升海水中提取出来的氘完全“燃烧”所放出的能量,等于几百升汽油完全燃烧所放出的能量。而且聚变产物不象核裂变那样产生大量的放射性物质造成环境污染,所以它是一种理想的能源。

但是,另一方面,可控的轻核聚变反应比起重核的裂变反应,也要求更为苛刻的条件。只有在很高的温度下(几亿度!)轻核才有较大的发生聚变反应的几率。这些原子核都带着正电荷,彼此互相排斥,把它们“挤”在一起无疑将是非常困难的一件事。物质原子在较高的温度下将电离成为离子和电子,这种电离了的高温气体称为等离子体。没有什么容器能够容纳这种高温等离子体,因为只要高温等离子体一和器壁接触,就会冷下来。现在人们找到的约束高温等离子体的传统办法是用强磁场,适当地选择磁场形态,可以使等离子体约束在空间的一定区域。实验发现,高温等离子体存在着许多种不稳定性,它总是“企图”从磁场中溜出去。二十几年的研究工作也主要是围绕着怎样用电流和磁场来加热和约束高温等离子体进行的。建立了很多种不同类型的装置,理论上实验上都取得了重大的进展,但距实现热核“点火”(指输入热核反应器的能量和从反应器输出的能量相等)的目标尚有较远一段距离。看来有装置愈造愈大、投资愈来愈多的趋势。激光聚变,则是新近发展起来的不需磁场约束的可控聚变的另一条新的研究途径。

激光出现十几年来,发展极为迅速。推动了许多科学研究、工业和国防部门的工作。脉冲激光器的峰值功率,平均每年提高一个数量级还要多些。由于激光器具有很高的功率(目前脉冲激光器的峰功率已达 $10^{12}-10^{13}$ 瓦),激光有很好的方向性、相干性和单色性,用透镜可以使之会聚在很小的范围内,因而短时间内激光焦点处光的功率密度是非常大的($10^{16}-10^{17}$ 瓦/平方厘米·秒)。焦点处的物质突然受到这样一束强激光的照射会发生什么现象呢?强激光与靶物质相互作用大致可以划分为三个阶段:首先是电离过程,形成等离子体;接着等离子体再吸收光的能量温度急剧升高,这一团被激光加热的等离子体由于高温高密而具有很大的压力,就迅速向周围的空间膨胀开去,并逐步变冷下来。电离的过程可以这样来看,激光焦点处的光子流密度是非常高的,靶物质原子中处在

* 1973年3月9日收到。

一定状态的束缚电子可以同时吸收几个光子的能量而电离(多光子电离, 见图 1)。也可以把光看作是极高频率的电磁波, 激光焦点处光波电场的峰值是非常高的, 它可以超过氢

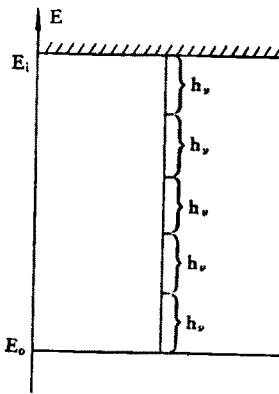


图 1 多光子电离示意图
图中 E_0 为原子对应某一电子状态的能级, E_i 为电离能。

原子第一玻尔(Bohr)轨道上电子受到的氢核的库仑场的强度, 因而这个光波电场可以使电子迅速脱离原子体系而离化。当然, 即使光波电场不及电子受到的库仑场作用强时, 由于量子力学里的所谓“隧道效应”也会有一部分原子会被电离的。这团被电离了的物质即等离子体的加热机制, 可以看作是电子和离子通过“逆韧致辐射”效应从激光吸收能量的过程。我们知道, “韧致辐射”是原子核(或离子)附近的电子受核(或离子)的库仑散射作用后放出光子而失去能量的过程; “逆韧致辐射”就是原子核(或离子)附近的电子吸收光子而获得能量的过程(见图 2)。等离子体中的电子周围有很多离子, 电子不断吸收光子而提高能量, 并通过和离子碰撞把一部分能量交给离子。这样, 如果把等离子体看作是服从麦克斯韦(Maxwell)分布的热力学平衡状态, 就可以说它的温度提高了, 即等离子体被激光加热了。这团

被加热到高温并且接近原来固体靶子密度的等离子体, 如果靶子是热核材料(即可以发生聚变核反应的物质, 如氢的同位素氘、氚或包含它们的化合物), 它们的核在这种高温高密度状态下就有很大的发生核聚变反应的几率, 这种聚变反应会放出极大的能量, 氢弹爆炸时就是这样一类核聚变反应。如果释放出的这些能量比送进去的激光能量大(严格地说, 是比送进激光器的能量大), 那么就可以把能量取出来做成所谓“脉冲式的聚变反应堆”了。

这团高温高密度的等离子体, 具有极大的热压力($P = nkT$)。现代的技术包括最强的脉冲磁场的磁压力都远不及它大。因此这团等离子体以很快的速度($\sim 10^7$ 厘米/秒)向周围的空间膨胀开去, 等离子体的温度和密度也就降低下来。温度和密度一降, 聚变核反应就停止了。所以这样的激光聚变反应堆只能是脉冲式工作的。

这种脉冲工作方式, 对于实现可控热核反应的目标也有它突出的优越性, 它不象一些传统的可控聚变研究装置上那样要用很大的磁场约束等离子体, 并且等离子体会由很多类型不稳定性机制逃脱磁场而“跑掉”, 因而那些装置复杂, 庞大, 造价很高。激光核聚变可以绕过等离子体各种不稳定性和磁场约束的困难, 成为目前可控聚变研究的主要途径之一。据不完全统计, 世界上已有六、七个国家近 20 个单位从事这项研究。美国, 苏联也在互相竞争。当然, 激光核聚变受到重视还有军事上的原因, 它首先是个强脉冲中子源, 并有可能代替原子弹来触发氢弹, 做为热核武器的一部分。

脉冲工作方式另一方面也对激光器提出很苛刻的要求, 就是要做到短脉冲、大能量。等离子体一经加热就迅速膨胀, 膨胀开来的等离子体就不再从激光里取得能量了, 所以能量必须在很短的时间送进等离子体。我们可以粗略地估计一下这段时间。激光焦点的尺

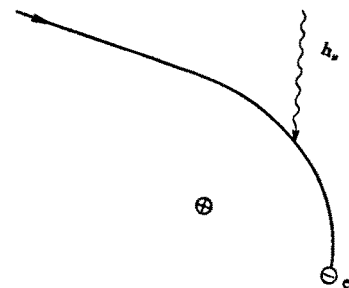


图 2 “逆韧致辐射”示意图
图中 \oplus 表示一原子核, \ominus 为一电子, $h\nu$ 表示一个光子。

寸一般在 100 微米左右, 粒子飞散的速度约为 10^7 厘米/秒, 因而粒子飞离靶子范围的时间大致为 10^{-9} 秒, 即一个毫微秒。这就要求激光器输出光脉冲的宽度是毫微秒量级的。现在的激光技术, 把光脉冲压到这个宽度是可以办得到的。困难的是在毫微秒的时间内, 激光器要输出很大的能量。计算表明, 要使脉冲反应堆“点火”, 即输出能量和输入能量相等, 激光器的单脉冲能量要达到 10^6 — 10^9 焦耳, 依选用不同的靶材料、状态及不同的理论模型而有所差异。现在的激光器和这个要求尚有较大的距离, 如苏联一台九束的钹玻璃激光器, 脉宽 2 毫微秒时输出能量 600 焦耳, 脉宽 16 毫微秒时输出能量 1300 焦耳(见图 3)。他们正在从九束增至 27 束, 希望单脉冲获得一万焦耳的能量。九束激光器打在氘化

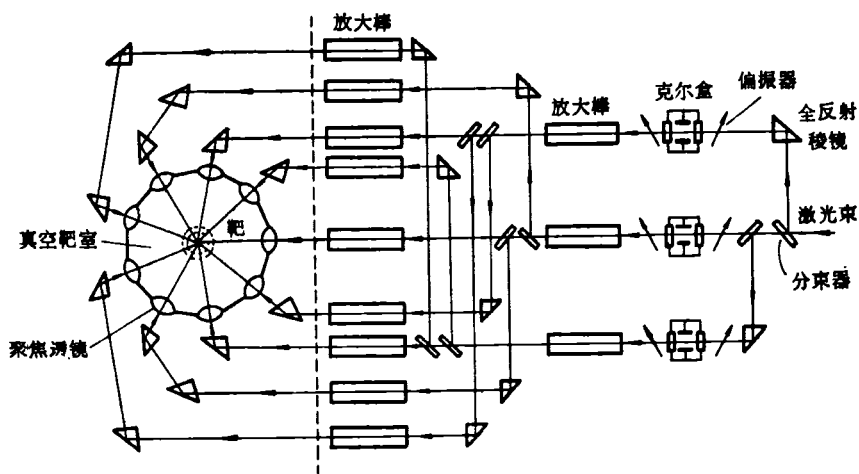


图 3 苏联列别捷夫(Лебедев)物理研究所的九束玻璃激光器打靶示意图

左面的箭头为前置放大钹玻璃激光器发出的激光束。

聚乙烯 $[(CD_2)_n]$ 靶上, 观测到一次脉冲的中子数为 3×10^6 个。等离子体的电子温度约在一千万度左右。这样的激光等离子体距聚变“点火”的劳森(Lawson)判据(对氘氚各半的等离子体, 其密度和约束时间的乘积 $n\tau \geq 10^{14}$, 温度 $T \geq 5$ 千电子伏), 也还差得较远。

从器件方面看, 达到上述指标的可能性是存在的。除固体钹玻璃多束激光器有发展前途以外, 国外近来正在发展一种电子束泵浦的横向激发大气压二氧化碳激光器(简称为 e-beam TEACO₂ 激光器), 这是一种波长为 10.6 微米的分子气体激光器。现在国外已经做到了单脉冲千焦耳的能量输出, 看来器件发展的潜力是比较大的。但靶子对 10.6 微米中红外波长激光的吸收系数如何, 还有待进一步的研究。至少这种激光器与传统的聚变研究的装置相结合, 做为一种加热等离子体的手段也会是有用处的。这种器件效率高, 一般可达 10—20% (钹玻璃激光器只有千分之几), 可以实现高重复频率, 适合于脉冲型聚变堆的设计。其它一些类型的高功率器件也可能会有前途, 如西德搞的原子碘光化学激光器, 已达到 1.2×10^9 瓦的峰功率。苏联和美国还都在搞一种高压氙激光器。美国最近报导得到 300 兆瓦的峰功率。探索新型的高功率激光器, 也是实现激光核聚变的重要前提。

靶子的材料和状态,对“点火”所需的激光阈值能量也有很大的关系。从理论上考虑,靶子的密度提高,会使所需的激光能量显著降低。美国最近发表了一些所谓“爆聚”模型的消息,是说让激光同时从四面八方打到靶丸上,并对激光脉冲波形进行“整形”以达到一定的要求,使打在靶丸上产生一系列会聚的球形冲击波,这些冲击波后面的追赶前面的一齐到达靶丸的中心,计算机给出中心处具有只有恒星内部才可能达到的极大的压力(10^{12} 大气压)。据称这样它可以把固体或液体的靶丸密度压缩一万倍,从而使“点火”所需的激光能量下降三个数量级。苏联也有人提出在靶里掺进重原子以提高等离子体温度从而降低所需能量的考虑。这方面也是值得研究的问题。

强激光与物质,特别是与高温、高密度等离子体相互作用的研究,已形成物理学发展中的一个新课题,引起了整个物理学界的重视。但目前关于这方面的理论还远不是成熟的。实验方面也是很系统、很不全面的;并且存在着一些现在还不好解释甚至矛盾着的实验现象,有待深入一步的探讨。

总的看来,可控聚变反应的研究中,现在还是在高温等离子体物理基本现象和规律的研究阶段上,还是在通过各种途径、各种装置的探索,去接近和达到热核“点火”的指标。当然,在达到“点火”指标以后,到建成实际可用的聚变反应堆,还要经过相当长阶段的技术上的努力。现在要判定哪一种途径一定比其它的途径更好还为时过早,或许是应该把它们中间一些优点结合起来开辟新途径。但象激光核聚变这样迅速发展着的新领域,它比一些传统的聚变研究方案,具有一些独特的优点和潜在力,因而在可控聚变的研究中,是非常引人注目的。

参 考 文 献

- [1] D. M. William, *Science*, **177** (1972), 1180.
- [2] *Physics Today*, **25**(8) (1972), 17.
- [3] L. Artsimovich, *Nature*, **239** (5366) (1972), 18.
- [4] J. Nuekolls et al., *Nature*, **239** (5368) (1972), 139.
- [5] K. Brueckner, *KMS-Fusion Report KMS-NP5*.
- [6] *Laser Focus*, **8**(12) (1972), 14.
- [7] Н. Нора, *Laser 4 Jahrgang* (1972), Nr 4, 22.
- [8] Н. Г. Басов и др., *Письма в ЖЭТФ*, **15** (1972), 589.
- [9] Н. Г. Басов и др., *ЖЭТФ*, **62** (1972), 203.
- [10] F. Floux, *Nuclear Fusion*, **11** (1971), 635.
- [11] S. W. Mead et al., *Applied Optics*, **11** (1972), 345.