

取之不尽·用之不竭的理想能源

激光惯性约束核聚变

王 淦 昌

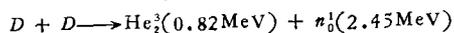
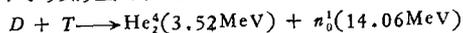
能源,是人类生存活动中不可缺少的、重要的资源。几千年来人类为了求得生存和发展,不断地探求向大自然索取能源。二十世纪以来,人们开发利用了太阳能和原子能。原子能又分裂变能和聚变能。从四十年代起,裂变能已为人类所掌握和利用。五十年代开始,人们又在进一步探索聚变能的利用问题,已经有不少国家建造了受控核聚变研究装置,而且近年来的研究工作都有不同程度的进展,尤其是惯性约束核聚变的研究,目前又有新的突破。从前认为利用聚变能是遥远的事,而现在看起来要比从前乐观了许多。

我国人口众多,能源缺乏。在人口稠密、工业发达的地区,常因能源问题,工厂开工不足致工业生产和人民生活,带来困难。因此,开发利用聚变能既是相当迫切、又是非常实际的问题。因为它是一种取之不尽、用之不竭(燃料从海水中提取)的最干净、最完整、最经济的理想的能源。我国在这方面已经建立了磁约束聚变装置,和惯性约束聚变装置,进行了多年的研究工作,取得了很好的研究成果。可以这样自豪地说:我国受控核聚变研究工作已经有了很不错的基础。

一、惯性约束核聚变

今天我将向大家介绍激光惯性约束核聚变的新进展,讲这个题目之前,先向大家简单讲一讲什么是聚变能。

大家知道,氢有三种同位素,即氢、氘、氚,氘和氚聚合在一起产生 α 粒子(氦核)和中子,同时发出17.6百万电子伏特的动能。令 D, T, n, He, H^+ 代表氘,氚,中子,氦,氢等核的粒子:



二个粒子有一定的相对速度聚合在一起就能产生那么多的能量,应该充分利用。这种能量就叫核聚变能。但要得到这种能量却不是简单的问题,全世界先进的国家都在致力研究、探索得到这种能量的办法,激光惯性约束核聚变的研究就是探索的途径之一。什么是激光惯性约束核聚变呢?简单地说,它是利用高功率的脉

冲激光均匀地照射氘氚燃料靶丸,由靶石物质的熔化喷射而产生的反冲力使靶内物质受到约束,并迅速被压缩至高密度和热核燃烧所需的高温,从而发生热核爆炸,释放聚变能(见图1)。

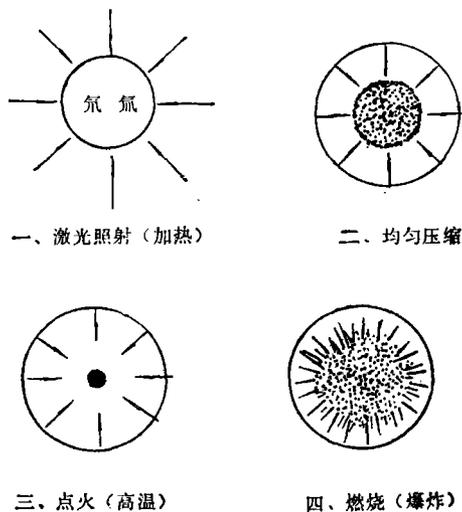


图1 激光惯性约束核聚变的基本过程示意图

科学家通过研究了解到:要得到聚变能,其基本条件一是高温,一是满足劳逊判据。

先说高温条件。我们知道原子核都是带正电荷的,因此,为了使氘核和氚核聚合在一起,就必须克服库仑斥力,使两个原子核彼此靠近到核力的作用范围以内。但是核力的作用范围小到 10^{-13} 米的量级,在这样的距离上库仑斥力变得非常之大。为了克服这样大的库仑斥力,氘和氚应当有足够大的初始动能,这相当于把它们加热到4万度以上的高温状态。氘和氚在这样高的温度底下已不再保持原子状态,而形成了等离子体,一种由正离子和电子组成的特殊的物质形态。

当前等离子体的离子和电子温度超过某个特定值

(注) 王淦昌教授是我国著名科学家这是王淦昌教授在中国核学会举办的《核与高技术系列报告会》上作的报告。

(我们称为点火温度)时,通过核聚变反应释放出来的能量将会超过等离子体场由于韧致辐射而消耗的能量,等离子体的温度才能维持下来。对于氘-氦系统来说,这个温度为 $5 \times 10^7 \text{K}$ 。

再说劳逊判据。所谓劳逊判据,指的是这样一个关系式:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{cm}^{-3} \text{秒}$$

式中 n 是等离子体每个单位体积里的粒子数目, τ 是等离子体在这个密度下的约束时间, 10^{14}cm^{-3} 秒是对 $D + T$ 反应而言的。也就是说,等离子体必须在足够高的密度下约束足够长的时间,以保证足够长的氘核和氦核相互作用发生聚变反应。这个关系式是根据聚变反应释放的能量和等离子体消耗能量之间的平衡而推导出来的。按照劳逊判据, n 和 τ 的乘积必须不小于 10^{14}cm^{-3} 秒,才能得失相当。具体说,就是核聚变反应释放的能量应该相当于或大于激光器所给出的能量。惯性约束聚变燃烧时间 τ 很短,大约只有 2×10^{-10} 秒,这就要求粒子密度 n 越大越好,为此需要高压。 n 值越大,燃烧进行得越快,充分燃烧的时间就越短,释放的能量就大于激光用去的能量。目前 $n\tau$ 已达到 10^{14}cm^{-3} 秒,这是很令人兴奋的进展。当然,这与实现点火的条件还差一个数量级,要把燃料小球压缩到液体密度的 1000 倍,才能得大于失。

怎样实现高温高压呢? 必须有驱动器,把装有 T, D 粒子的小囊,驱动压缩如图 1 所示,使它的密度增加,同时也增加了粒子的温度。到现在为止,科学家们认为有四种驱动器是很有希望的。

(一) 钷玻璃激光。它是目前功率和能量水平最高的脉冲式激光器。它的激光波长为 1.06 微米,属红外激光。这种波长太长,近来找到了一种缩短波长的办法,这就是通过“倍频晶体”把频率提高到二倍到三倍,波长减半为 0.53 微米的绿光和 0.35 微米的近紫外光。这种

倍频

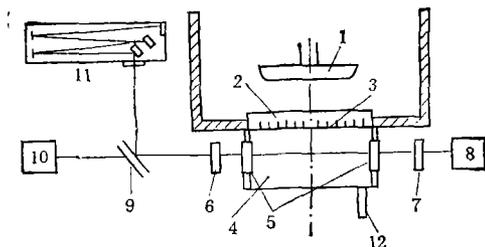


图2 KrF 激光产生装置及测试设备

1. 阴极 2. 阳极膜 3. 有支撑结构的电子入射窗膜
4. 激光器腔体 5. $\phi 80 \times 8$ 石英窗 6. $\phi 80 \times 8$ 石英半透镜 ($R = 58\%$) 7. $\phi 80 \times 8$ 石英全反射镜 ($R = 96\%$) 8. 光电管 9. 分光镜 10. 能量计 11. 光谱仪 12. 真空、充气系统

$$\text{KDP } 2\omega \lambda = 1.06/2 = 0.53 \mu\text{m}$$

$$\text{晶体 } 3\omega \lambda = 1.06/3 = 0.35 \mu\text{m}$$

$$4\omega \lambda = 1.06/4 = 0.265 \mu\text{m}$$

波长的激光能够较好地被等离子体吸收。它们不足之处是效率不够高,价钱昂贵。尽管这样,它作为激光驱动器,仍是很有前途的。

(二) KrF 激光(见图 2),它是准分子激光也是气体激光的一种,波长为 0.25 微米,发光效率较高,其总效率接近 5%,作为高功率的激光源是很有希望的。造价估计比钷玻璃激光约低一个数量级,因此,前途似是乐观的。

轻离子束作为驱动器,有效率高($\geq 30\%$)造价低(≤ 50 美元/J),在靶上的能量沉积行为比较简单,也不会对靶中心热核材料产生预热及产生超热电子等优点。轻离子束最主要的困难在于离子束的传输和聚焦。近年来各方面都在努力,但进展不大。

重粒子作为驱动器,理论上设想很多,美国伯克利大学和西德一起搞,仍在预制阶段。虽然从理论上看起来很有希望,但花钱太多(估计在十亿美元以上),中国近期不会搞。

激光驱动有两种办法,一种叫直接驱动,另一种叫间接驱动(又叫黑泪靶)。

直接驱动是激光直接照射燃料小囊见图 3 产生很大的压力,使小球压缩到很小,小到一定程度就产生核反应。发出很多能量。

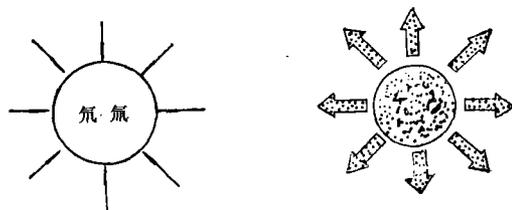


图3 直接驱动示意图

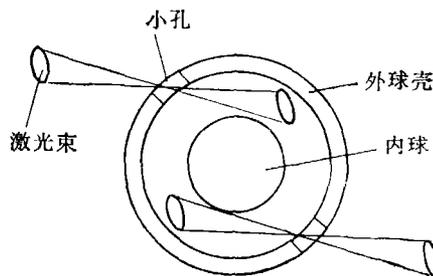


图4 间接驱动示意图

间接驱动是在氘氦燃料小球外面加一个外球壳(见图 4),激光从外球壳的小孔进入后,首先被外球壳的内壁表面吸收了,产生 x 光,均匀地压缩燃料小球并提高它的温度,到了一定程度小球就燃烧爆炸,产生聚

变能,它的主要优点是利用X光的效率高,能够进行均匀的压缩.现在美国、日本都在用间接法,结果很好,科学家们认为黑洞靶的应用是激光核聚变研究中一件很有前途的新事物.

综上所述,道理看来很简单,但为什么做了好几年还是没有成功呢?经过摸索,现在基本上找出了关键所在,这些关键是:

1. 高温高压,高温要求达到五千万度以上,高压使密度从每立方厘米 0.21 克增加到 200 克.

2. 压缩的均匀度要求达到 1% 以内,只有用间接驱动法产生的 X 光才能达到这个均匀度.从前不大知道,现在摸索出来了.

3. 最关键的是短波长.从前美国人用 CO₂ 激光,波长 10.6 微米,太长.现在的钕玻璃激光,波长 1.06 微米,还不够短,可以三倍频到 0.35 微米的紫外光. KrF 激光波长达到 0.25 微米,到目前为止,这个结果已经很不错了.为什么要短波长呢?因为波长太长,超热电子太多,被小球吸收后即发热.因而压不紧.短波长,超热电子少,可以进行冷压,达到需要的高密度.

4. 中心点火.不是整个球都点火,那样花的能量太大.只是中心点火(全球的 0.02),向周围热导.

这四个关键解决了,惯性约束核聚变反应就成功了.

全世界先进的国家都在寻求解决这四个关键的办法,美国、法国、日本做了许多试验,得到了很好的结果.例如在短波长试验方面,美国 LLNL 的 Argus (相当于中国的神光装置)激光以三种不同的波长分别照射金靶和钨靶所得的结果表明短波长的吸收效率高,超热电子少,可见短波长就是能解决问题.现在我们也找到了达到短波长的办法,就是前面说的靠 KDP 晶体(见图 4),这是世界上最好的晶体,由我国福建物质结构研究所及山东大学做的,纯度高,效率高,也可以说是我们的王牌之一.

顺便讲一讲燃料小球的做法.小球外面还加一层东西,是低 Z 低 P 泡沫材料,激光打到泡沫材料上来压缩燃料小球,这样效率比较高,小球里面的氘氚燃料是液体的(见图 5).是在低温(约 -200℃ 以下)下做的,当然在压缩到一定程度时,点火燃烧的温度是很高的,达到几千万度以上.

二、国际上激光惯性约束聚变的新进展

国际上激光聚变研究的最新结果是令人非常高兴

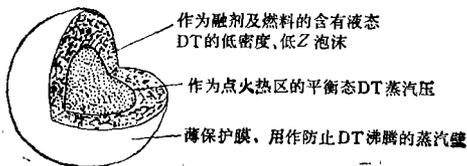


图 5 氘氚燃料小球示意图

的.以前 $n\tau$ 曾经长期停留在 $10^{11}\text{cm}^{-3}\text{s}$ 现在已经达到了 $2.4 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}\text{s}$, n 已达到 $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 相当于液体密度的 100 倍,温度达到 1.7 KeV,中子产额在 10×10^{10} 以内,不算高,(高了不一定好)使人更高兴的是这些数据都与一维计算符合得很好,表明用间接法进行球形压缩很好.试验用的能量是 20KJ,波长 0.35 微米 (3ω),约束时间 1 毫微秒.得出这个结果是很了不起的.从前无论如何达不到.将来还有希望提高到 $n\tau \rightarrow 2 \times 10^{11}$,温度也提高 4KeV (在中心点火范围内).用直接驱动法试验的结果是温度高到 8—10 KeV, $n\tau$ 值小了, n 也小了,中子产额增高,这种结果不太好,不是我们所希望的,因为温度高了,压不起来,要用很多能量,但它可以做诊断用.

从前因为波长问题,压缩不理想,体积很大,就没有办法达到聚变反应,从表 II 所列数据.我们可以看到压缩的必要.

美国新近才部份解密的名叫 Halite-centurion 的一系列地下核试验,也做了相似于室内微型聚变装置的试验,结果也完全符合一维理论计算,表示 10MJ 甚至 1.5MJ 就足以点火,使小球燃烧起来,得到相应的增益.他们根据这些试验的数据,设计了实验室微型聚变装置,亦叫实验室微型氢弹.氘氚小球总重量为 10 毫克,压缩前的直径为 5mm,液态正常密度为 0.21 毫克,压缩后,小球直径减少到原来直径的三十分之一至四十分之一,密度达到 200 克/cc 左右,相当于原来的 1,000 倍,温度提高到约 5,000 万度.输入能量是 10MJ,输出能量为 1000MJ,相当于四分之一吨 TNT,这样,受控核聚变反应基本成功.

因此,美国科学院在 1986 年的惯性约束核聚变计划中认为,约需五年时间(即到 1991 年)可以完成他们的计划,现在由于 LLNL 的 NOVA 工作的进展,这个计划超前三年完成,促使美国能源部雄心勃勃地决定发展室内微型聚变装置.看来实现标志纯聚变(即没有裂变,没有三废,不需要后处理)的核电站的可能性已经在望了.

三、激光惯性约束核聚变的应用

应用有三个方面,军用、基础研究、发电.

1. 军用.激光惯性约束聚变比磁约束聚变在军用上有其独特的优势,磁约束聚变不可能用于军用,因为它的工作速度慢.惯性约束聚变速度很快,它可以做模拟核爆,进行各种效应试验,还可用于电子学、器材等的加固工作.

2. 基础研究,应用的范围很广,可以用来做高温高压试验,天体星球物理的研究,激光原子物理前沿的研究及其他.

3. 发电,脉冲式的每秒钟二次,发 0.25 吨 TNT 能量,一天二十四小时,相当于 125 万千瓦热功率的核电站.关键是怎样才能实现持续的一秒钟二次或数次,

KrF 激光有可能做到,因为它是气体,可用循环的方法多次重复,是最有希望的一种。

四、我国激光惯性约束核聚变研究工作的现状

我认为国内的研究工作是很不错的,做了许多工作,有了很好的基础。上海光机所的激光技术非常好,他们已进行了 10 多年的研究工作,有很强的、很有头脑的领导骨干队伍。他们已建立了单路、二路(又叫神光)六路激光器,具有一定的规模,并且进行了独创性的工作。在国际上已有一定的影响,但他们理论队伍较弱核工业部九院的物理理论很强,实验和诊断技术也很好,但他们没有激光技术。大家知道,中国民间有个故事,说一个瞎子,有腿,但看不见走不了路,一个拐子,有眼睛,但腿不行,也是走不了路,这二个人一合作就可以取长补短,就能到处跑。故事中的道理同样可以用在上海光机所和九院这两个单位,他们联合起来,成立联合研究室就可以发挥很大的作用,做很多事情,可以跟踪外国,可以做室内微型聚变装置(LMF)实验,事实上这种试验已经在进行。

中国原子能研究所做的 KrF 激光(见图 2),它的最大特点前面已经说过,效率高,重复性能好,波长短,

但由于资金不足,进展的速度不够理想。日本比我们晚好几年才进行 KrF 试验,由于资金雄厚,已经建了六个 KrF 装置,实验工作已大大地超过我们。

我认为我国激光惯性约束核聚变是完全有希望的,只要国家支持,认真投进人力、财力,就有可能突破。过去我们只是埋头研究工作,忽视宣传,所以外界对我国惯性约束聚变研究的状况几乎一无所知,实际上我们有很强的能力,有优秀的队伍,有齐全的设备,有这样好的基础而不去充分利用和开发,很可惜。裂变的核电站当然需要,但应把眼光放得更远点,聚变的核电站也不能忽视,希望也能重视惯性约束聚变研究工作,二方面都应重视。我想只要配备适当的人力、财力,我国的惯性约束核聚变研究一定能够做出成绩,赶上世界先进水平。

在结束我这篇报告时,我还要再说几句,我们不会忘记,磁约束聚变研究方面,也做了不少工作,取得了很好的成果。在实现核聚变反应方面,究竟哪一种途径更快些?现在还很难断定,希望大家都努力工作,深入探索研究,争取早日实现我们的共同目标——和平利用核聚变能。

编者与读者

△现代物理知识第一、二期出版后,我们收到了许多读者的热情来信,有鼓励,有批评,对我们今后的工作改进有很大的帮助。在此,我们向每一位给我们来信的读者表示衷心的感谢。

著名科学家杨福家教授来信说:「喜读贵刊创刊号,值得庆贺,从爱护贵刊出发,提出如下小意见:……(略)供编辑参考。最后,我想指出:本信的主要目的是祝贺」。

北京大学冯孙齐教授来信说:「……看后感到这是一份很好的普及刊物,特别是在目前物理学被社会轻视,读书无用论又广为泛滥的情况下,你能坚持出版这样的刊物,其精神实在令人钦佩……」

许多物理学家得知「现代物理知识」科普杂志创刊,非常高兴,他们用不同的方式表达了他们对「现代物理知识」这朵刚出土的小花无微不至的关怀之情:

一些著名科学家特为「现代物理知识」撰文、熊家炯、方励之、叶佩弦、叶铭汉、霍安祥、管唯炎为刊物写了专文介绍物理学各学科的发展和进展情况。尤使人感动的是八十多岁高龄的著名核物理学家王淦昌教授在阅读了「现代物理知识」后,请秘书专程送来了他的新作:「取之不尽、用之不竭的理想能源——激光惯性约束核聚变」一文。(刊登于 1986 年第四期)

不少科学家为「现代物理知识」出谋划策提出了不少建议和意见。热情鼓励编辑部要提高中华民族文化素质而做好科学普及工作。在此,我们向每一位关怀「现代物理知识」的科学家和朋友们致以崇高的敬礼!

我们也收到不少读者,提出了不少意见和建议,反映现代物理知识不够浅显,深奥难懂,版面不够活泼,使人产生望而生畏感觉……有的读者建议建立一个「读者问答专栏」……在此,我们编辑部全体同志也向每一位来信的读者深深鞠躬,感谢你们的热情关怀,我们对你们的每一条意见都要认真研究,尽力改进编辑工作。

△现代物理知识是一份中、高级科学普及杂志,本刊的读者对象是高中和高中以上程度的读者,大、中学物理老师、科研工作者及管理干部。为了更好地宣传、普及现代物理的知识,我们一定要努力改进工作,力求将现代物理知识办成具有科学性、通俗性和趣味性的科学普及刊物。希望朋友们在探求知识奥秘的同时,能增添欢愉和乐趣。我们希望通过编者、作者、读者的共同努力,使现代物理知识能茁壮成长,成为大家的好朋友。