



王连璧 李惠信

据报道,美国建成了世界上最大的聚变实验反应堆,这座聚变反应堆“于1982年12月24日首次运转了大约一眨眼的功夫”。还有报导说,欧洲共同体在牛津附近的卡勒姆聚变实验室,经过五年建设后“开动十分之一秒进行初步实验”。

那么,聚变反应堆是一个什么样的装置?所谓聚变反应堆,就是一座可以输出能量的可控轻核聚变反应装置。它的特点是:第一,以轻核(如氘核和氚核)聚变反应作为能量来源,这一点相同于氢弹;第二,反应率可以控制,不象氢弹那样一旦反应开始就无法控制而直到毁掉整个装置;第三,可以输出能量供应用,就象裂变反应

堆可以输出能量那样。

聚变反应堆的建成,将开创一个具有无限能源的新时代。

一、聚变核反应及输出能量的条件

核物理学家们发现,某些轻核素,在一定条件下可以彼此聚合成较重的核素,同时释放出相当多的能量。例如一个氘核和一个氚核能聚合成一个氦核,放出一个中子和约17.6百万电子伏特(1电子伏特等于 1.6×10^{-19} 焦耳)的能量。这就是说两克氘和三克氚全部聚合成氦时,放出约一万七千七亿焦耳的能量。要产生同样多的能量需要裂变二十多克铀-235或燃烧四百多吨优质煤!威力巨大的氢弹就是轻核聚变反应放出巨额能量的例子;太阳和其他恒星的能量也是轻核聚变反应释放出来的。

由于原子核都带有正电荷,所以两个反应核互相排斥。在核力作用范围($<10^{-12}$ 米)内的距离上库仑斥力很大,要使两个原子核,即使带电量最小的氘核和氚核靠近到能发生聚变反应的距离,也必须给予它们足够大的初始动能,以克服库仑斥力。据计算所需初始动能应该大于15—20千电子伏特。如果用加热聚变核燃料的办法使氘、氚核获得这样大的初始动能,核燃料必须被加热到 10^8K ,即一亿度以上的高温。在这样高的温度下,实际上所有的原子都经受剧烈碰撞而失去轨道电子,形成“等离子体”——电子和正离子的混合物。

因为聚变反应发生的几率很小,聚变反应堆中的

等离子体必须在上述高温下有足够大的密度或维持足够长的时间,才能发生足够多的聚变反应,以产生多于维持反应所需要的能量,即可以输出能量。据理论研究,等离子体密度 n 和约束时间 τ 的乘积应当超过一个最小值—— 10^{14} 秒/厘米³,即

$$n\tau > 10^{14} \text{ 秒/厘米}^3.$$

这就是著名的劳逊(Lawson)判则。它是由包括聚变能量产生率、等离子体能量损失率在内的功率平衡所确定的。

二、加热和约束

怎样使等离子体达到足够的温度和密度或维持在一起足够长的时间呢?

聚变反应堆运行后,聚变反应所需要的高温可以通过反应释放的能量来维持,但是在反应堆起动时必须由外部能量“点火”加热。加热的方法有:让强大的电流通过等离子体,产生焦耳热,使等离子体温度升高;对等离子体做功,绝热压缩等离子体使其温度升高;用由加速器加速的高能氘核产生聚变反应,由聚变反应放出的能量加热;用大功率激光束照射燃料,由激光能量加热;等等。

为了使加热后的等离子体在一起维持足够长的时间或足够高的密度,即满足劳逊判则,必须对等离子体进行约束。由于加热后的等离子体的温度很高,与任何物质接触都将使其化为“一缕青烟”,所以不可能将等离子体装在一般意义的容器中进行反应。目前,约束等离子体并使其超过劳逊判则的途径有两条:一条是惯性约束,另一条是磁约束。

惯性约束是利用激光束或电子、离子束同时从几个对称的方向打击聚变燃料小球,依靠内向运动的惯性使聚变燃料达到很高的密度并维持在一起极短的时间(小于 10^{-9} 秒),发生足够多的聚变反应。例如,美国洛斯阿拉莫斯实验室,计划用二氧化碳激光器产生 20×10^{12} 瓦/毫微秒和 40×10^{12} 瓦/毫微秒的脉冲激光束,打击直径100微米的氘氚燃料小球,引起小球内向爆炸,实现等离子体的高密度和高温,发生瞬时聚变反应。

磁约束是根据带电粒子在磁场中运动时只受到垂直于磁力线的力而沿磁力线作螺旋线之动,通过特殊设计的磁场使低密度等离子体不与容器接触地在一定区域内维持足够长的时间,以发生足够数目的聚变反应。磁约束中最成功的装置是托卡马克。托卡马克一词是环形磁约束的俄文词头的缩写。这种装置是由苏联物理学家萨哈罗夫设想的,阿尔茨莫维奇发展了它。它通过环形磁力线和圆形磁力线矢量相加实现了磁力线扭转,并通过巧妙的设计使等离子体在一段时间内被稳定地约束在一定区域内。据说美国建成的聚变实验堆就是一个托卡马克装置。

无论惯性约束还是磁约束，都需要复杂而精密的技术设计。

三、聚变反应堆的前景

聚变反应堆与裂变反应堆相比有许多优点。例如，聚变反应堆的燃料氘和氚丰富或易于获得。据估计，地球表面海水中的氘就有 10^{14} 吨，氚也可以通过中子与锂反应而很容易地得到。其次，聚变堆的反应产物无放射性，特别是如果实现了利用只产生带电粒子的反应的聚变堆后，将没有与聚变反应堆相联系的放射性产生，这可以省掉讨厌的放射性废物处理过程。第三，聚变堆产生的能量是巨大的，如果能建成聚变核电站，几乎可以无限期提供人类所需要的全部能量。

但是，要把聚变反应堆建成动力堆仍然面临着许多技术挑战。例如，为了长时间地约束高温、高密度的

等离子体，必须有很强的磁场。产生这种强磁场需要极大的电流。如果用普通导体载流，将会产生极强的焦耳热损失，所以最好用超导体载流。而就目前所知超导体必须保持在极低的温度下，因而在高达亿度的等离子体周围应用超导体就是一个困难问题。再如，氘-氚聚变产生高能中子，必须进行屏蔽，且必须在反应区周围布置相当厚的富锂层产生氚。而高能中子将会激活屏蔽层等中的物质，使其具有很强的放射性。还有，把聚变反应堆产生的能量转变为可供利用的电能等方面，也存在许多有待解决的问题。

总之，聚变反应堆的建成是巨大的科学成就和工程成就。但是，为了发展和积累实质性的手段，使聚变反应堆投入实际应用，还需要科学家和工程师们做极其巨大的努力。