

等离子体与受控热核反应

P. L. 卡比查

选择什么题目作为我获得诺贝尔奖金的诺贝尔演讲使我着实为难。因为一般这种讲演总得与获奖的工作有关。我是由于在低温物理方面的工作而受奖的，但三十几年前我就离开了这一领域。尽管这个研究所仍然在我的领导下进行着低温研究工作，而我个人却正在从事着高温等离子体现象的研究。高温是产生热核反应所必要的条件。此项研究已经取得了一些有意义的结果并开辟了新的途径。我想，用它作为这次讲演的题目会比以我过去的低温工作为题更有意义。所谓“相反者相成”。

大家知道，许多国家正在大力从事聚变的研究。这是与高温等离子体的基础研究相联系的。聚变实现的可能性是毫无疑问的，因为在氢弹爆炸中就已经产生了聚变反应。在理论上我们对核聚变也有了与实验一致的深入了解。但是直到现在，尽管我们做了很大的努力，花了很多钱，还没能控制聚变这个过程使之成为一种有用的能源。肯定这是一项十分艰巨的事业。

热核反应是在高温等离子体中发生的，为了实际地利用中子的能量，反应产生的功率必须大于用以维持高温等离子体温度所需的功率。因而从中子所获得的能量必须比等离子体中电子的韧致辐射能量大得多。计算表明，为了产生有用的能量，D + D 反应所需要的离子温度比 D + T 反应要高十倍。虽然 D + T 反应所需温度较低，但由于需要燃烧锂而受到了限制，锂在自然界中的总量是有限的。此外，采用锂似乎会大大地使反应堆的设计复杂化。计算表明，为了获得有用的能量，对 D + D 反应，等离子体中的离子温度约为 10^8K ，而对 D + T 反应约为 10^7K 。

很清楚，为了实际地“生产”能量，实现受控

热核反应的技术问题则归结为获得一个等离子体，其离子温度至少为 10^8K 而密度为 $10^{13}-10^{14}$ 个/ cm^3 。显然，通常任何的容器是不可能容纳这种状态的等离子体的，因为没有一种材料能经受住这样高的温度，已经提出了许多盛装等离子体和使它热绝缘的方法。

最原始而又最有希望的方法是苏联所提出的“托克马克”。已经搞了十多年了。实际上，用这种方式来约束等离子体并不那么简单。主要的困难是由一些开始时没有完全估计到的因素造成的。为了产生热核反应就必须加热 D 和 T 的离子，把能量传给它们的主要困难是由于等离子体是靠电流来加热的。这时，所有能量先传递给电子，然后再慢慢地转移给离子。由于离子的质量比电子质量大的多，在温度较高时，这种形式的能量传输效率就更低了。为了将离子加热到所希望的温度，所需要的加热时间 Δt 将远大于可以维持的电流加热等离子体的时间。可以很容易用下面的公式估算离子加热时间的下限：

$$\Delta t > -2.5 \times 10^7 \frac{f}{\Lambda} \frac{T_e^{3/2}}{n} \ln \left(1 - \frac{T_i}{T_e} \right).$$

假定加热时等离子体密度为 $n = \frac{7.3 \times 10^{21} p}{T_e}$ ，

压强 P (大气压为单位) 以及电子温度 T_e 为常数，系数 f 为离子质量与质子质量之比， Λ 是熟知的对数因子， T_i 为离子温度。托克马克装置中采用 D + T 反应，所需要的约束时间 $\Delta t > 22$ 秒，而对于 D + D 反应，所需要的反应约束时间 $\Delta t \approx 2 \times 10^3$ 秒。而要达到这样长的时间十分困难。还有，如果等离子体在完成加热之前，所有从电容器得到的能量都被电子辐射大量损失掉时，托克马克将如何工作？这就是为什么现在的托克马克设计中要重视辅助加热的原

因，辅助加热的能量仅用作等离子体的初始点火，但能量反而比电子感应加速过程中的能量大。辅助加热的能量必须通过电子的库仑散射更为有效的方式传递给离子。为此，有两种可能的机制，第一种机制现已采用，即把已加速到热核反应所需温度的D或T原子注入到等离子体环中，第二种机制是利用高频环流在外磁场中激发径向阿尔芬磁声波来进行加热，我们知道，磁声波耗损的能量是直接传给离子的，而且所传递的功率足以加热离子并能使其温度维持足够长的时间，因而离子的加热问题可以解决了。但是，托克马克的工作方式比最初设想的要复杂，托克马克装置的设计也相应变得更为复杂，其效率则下降。所有的核反应堆产生的功率是与活性区的体积成正比的，而损失的能量是与活性区的表面积成正比的，因而尺寸大的核反应堆效率高，同时，核反应堆还存在着一个临界尺寸，超过这种临界值才会产生可供利用的功率。所需要的实际尺寸不是由科学家们来确定的，而通常是由设计这些设备的工程师们通过适当地选择各种辅助设备并根据必要的生产技术来确定的。进一步的发展往往取决于工程师们的聪明才智。这就是为什么托克马克的临界尺寸主要取决于设计方案的原因。我个人认为现已发表的设计方案得到的临界尺寸是无法使这些托克马克获得成功的。但实践证明人的发明创造力是无穷尽的，所以谁也不能肯定实用的托克马克临界尺寸将永远得不到。

必须注意到，尽管在托克马克中达到热核反应的主要困难是D和T离子的加热问题，但仍然有一些悬而未决的其它困难。如等离子体中来自容器壁的杂质将大大地降低反应的速率。另外，中子吸取能量同样会使托克马克的设计变得复杂并导致临界尺寸的增加。总之，在理论上，我们没有理由说托克马克受控热核反应行不通，但是，现有的实际规模还达不到释放可供利用能量的可能性。

在其它一些受控热核聚变中应考虑非磁约束的脉冲方法。其想法是在一个很短的时间内加热一个直径为1mm的D+T靶丸而使它来

不及飞散开。为此需要有很高的压力才能保证在离子和电子间有很强的热传导。假如这种热核反应在D+T靶丸中可以充分产生，就必须有功率强大的聚焦激光源从四面八方同时地在大约1毫微秒内加热靶丸。这是一个复杂的加热过程，但利用现代计算机可以计算出所有必要的条件。如果我们用聚焦得很好的激光束去照射靶，那就会产生核能的净增。然而仔细一考虑就又不清楚如何解决这些技术和工程上的困难了。例如，如何保证照射的均匀性和同时性？以及如何有效地利用中子的能量？也许有人会说，理论是怪动听的，但要推动工程进展目前的技术达不到。我认为，虽然激光内爆似乎比托克马克那样的脉冲磁约束希望小，但还是不能完全否定这是一种解决问题的办法。

热核反应堆的第三种方法是在发展连续工作的高功率微波发生器时偶然地发现的。1950年我们用高功率微波辐射通过一个充有10cm Hg氦气的石英球而观察到有明确边界的发光放电。这种等离子体放电的边界是弓弦形状的，我们称这种等离子体为等离子体块，块长等于微波波长的一半，在低功率放电时边界模糊而发光呈弥散状。在高功率放电时，在放电体的内部有清晰边界的弓弦状的核，同时发光度增强，放电直径增大。实验表明，放电功率愈强，气压愈高，有明确形状的放电区也愈稳定。等离子体的电导率及其它参量的诊断测量都使我们坚信：在功率为15kW，气压为25个大气压时，放电区的中心部分有非常高的温度——超过 10^6K ！这意味着在等离子体块表面有一个非常高的热绝缘层，这种温度跃变的物理本质可以用边界上存在一个双鞘层使等离子体内高温电子在边界反射而不致损失来解释。双鞘层的存在造成了弓弦放电边界上等离子体密度的间断性。只要在放电的边界上离子温度远低于电子的温度，并且电子温度不是远大于高电离的等离子体温度时，双鞘层的温度间断性是显然可以存在的。这样，等离子体块的中心部份，离子温度就可以达到很高的数值。我们知道，等离子体内心和表面的温度差取决于离子气的热通

量和热导率,而通常等离子体的热导率是高的,但在强磁场中,横向热导率可能变得很小,因而可以指望,在强磁场下,内心离子温度与电子温度差不多,而且温度能够足够地高,高到在氘或氚等离子体中可获得热核反应,这就是我们设计提供有用能量的热核反应堆的基础。的确,我们按此做了这种热核反应器的一般设计。至今为止,还只有我们研究所发展了这种方法。

在过去几年中,我们对等离子体中的一些过程又有了进一步的了解,主要是改进了微波诊断技术,径向密度分布已测到5%的准确度,并确定了它与磁场,气压及供给的微波功率的关系,所需的稳定条件也已经建立。所有这些使我们能将微波功率提高许多倍,而将电子温度增加到 $50 \times 10^6\text{K}$ 。倘若在这种情况下能够建立电子和离子间的温度平衡,即使不用磁声振荡对等离子体中的离子额外加热,也能达到D + T反应了。而反应器的设计比较简单,尺寸也比较小,所以,不仅热核反应器比较容易建造,而且中子能量也更易于转变为机械功率,从而避开了建立脉冲型热核反应器的主要困难。

我们现在能在我们的装置上获得气压为25个大气压的高频放电,能连续保持温度在 $50 \times 10^6\text{K}$ 。放电装置的尺寸还可以进一步增加,使传输功率进一步提高。总之,已经有了破记录的高温电子气,这温度甚至比太阳内部的电子温度还高,问题是如何把离子加热到同样的温度。因为,尽管电子气与整个放电体积中的离子相互作用,却并不容易用这种方式提高离子的温度。温度的平衡分为两步,第一步通过电子与离子的碰撞,能量由电子传给离子,这时,能量的传递显然是与体积成正比的。第二步是由离子到周围介质的能量传递,热通量将与等离子体的表面积成正比。因此,在一定的离子热导率下,对一定热导率的等离子体,其直径有一个临界尺寸。在这种尺寸下,离子温度接近电子温度,使所需的D + D或D + T反应能够发生。这是容易计算的。例如,对一般等离子体在无磁场时作计算,这时热导率由自由程决定。算出的等离子体尺寸必须有几公里!

这当然不切实际。只有把离子放在磁场中以减小热导率,从而减小截面。因为离子在磁场中的热导率显著减小,它不再由平均自由程决定而是由与磁场成正比的拉莫尔半径所决定。计算表明在几个忒斯拉场强下,可获得有热中子的等离子体块的直径为5—10cm。这样的装置是容易做的,我们现在正在建造。如果没有其它未预料到的因素,这种连续工作反应器不仅可获得D + T反应的条件而且也可获得D + D反应的条件。但我们确定热导率时未计及气体的热对流效应,而是假定平均自由程与拉莫尔半径相等。大家知道,即使在一般气体中,由于分子碰撞,对流传送的热量也比热传导大得多,而且,很不幸,即使对普通气体中随机湍流运动的简单情况,从理论上计算对流热传导实际也是不可能的。在等离子体情况下,过程取决于更多的参数,热导率的确定比一般气体复杂得多,但理论上可以估计哪些因素对对流率影响最大。

为维持对流必须提供能量,在气体中这个能量是从流的动能中吸取的,在静态等离子体中会有另外的能量激发对流,这种能量是与温度梯度有关的。定量地,这个过程用内应力来描述。麦克斯韦就曾证明内应力正比于黏滞度的平方和温度梯度的导数。在等离子体中,电子和离子的平均自由程在厘米量级,而温度是高的,按照麦克斯韦公式,内应力比在气体中大10个数量级,因此,既可能有对流,也可能有湍流。在有磁场时,肯定对这种现象会有影响。由于电场对对流的附加效应,即使用粗略的理论方法来估计对流的大小,也是不可靠的。只有用实验来研究这些过程,而这正是我们现在在做的。

任何情况下,法向热导率将降低离子的加热,因而热核等离子体应有较大的临界截面,相应地,能提供有用能量的反应器的尺寸也将增大,如果这个尺寸超过实际可能,就应该考虑减小法向的热传递的方法,在等离子体边界上造成一个无湍流层可以达到目的,这和流体中的Prandtl边界层相像。(下转第209页)