

## 等离子体与聚变物理的新进展

受控热核聚变是有长远意义的大型综合性的研究课题,其最终目标是获取轻核聚变释放的能量,从而根本解决能源问题。受控热核聚变是在高温等离子体状态下进行的,热核等离子体物理是当前等离子体物理的主要研究领域。现阶段聚变研究的中心任务,是掌握高温等离子体的规律,以寻求实现热核点火的方案。目前主要通过两种不同的途径进行探索:一种是磁约束方法,这是主要途径,其中最重要的是托卡马克型装置;另一种是惯性约束方法,利用激光或高能粒子束实现聚变。等离子体物理的一个重要研究领域是空间及天体等离子体物理。

### 一、新型托卡马克与通向点火之路

托卡马克是一种采用环形等离子体的磁约束聚变实验装置。通常的托卡马克装置一般设计成圆截面的形状。对这种传统托卡马克的实验与理论研究,在了解等离子体的行为和提高等离子体的参数等方面取得了重要的进展。但是对传统托卡马克的理论分析得到了比较悲观的结论:传统托卡马克难以约束达到点火条件和反应堆条件的等离子体。

现今,上述传统的托卡马克已逐渐让位于一种新型的托卡马克。新型托卡马克中的等离子体采用非圆截面,截面在对称轴方向显著拉长并且高度变形。这使等离子体中能通过更大的电流,从而可提高比压(等离子体压强与磁压强之比)和改善能量约束。在新型托卡马克中装有偏滤器,这是一种用磁的方法限制等离子体边界的装置,可以改进粒子的约束和控制杂质,新型托卡马克中还采用射频加热方法,能够很好地控制加热的分布。

目前,世界上有三台重要的新型托卡马克在运行,它们是:JET(由欧洲原子能委员会联营),DIII-D(在圣地亚哥的GA Technologies)及PBX-U(在普林斯顿等离子体物理实验室)。一个正在设计的新型托卡马克装置

叫CIT,计划用来研究点火条件下等离子体中聚变产物 $\alpha$ 粒子的加热效应。

新型托卡马克主要有以下优点:

**1. 提高比压** 由于聚变输出功率正比于等离子体压强的平方,因而一个十分重要的问题是如何提高等离子体的压强。这就要求托卡马克能达到较高的比压。

理论上认为比压的极限是由等离子体的稳定性决定的,主要与气球模和扭曲模有关。气球模是一种内部磁面的局域螺旋形扰动,在弱磁场区扰动较强;扭曲模是外层磁面的螺旋形扰动。气球模和扭曲模不稳定性同时出现,可导致等离子体的急速剧烈的破裂。实验探索及磁流体力学(MHD)的理论研究表明,新型托卡马克可改善稳定性,从而能达到较高的比压,把等离子体的截面拉长为D形和增大等离子体电流,可使发生扭曲模和气球模的比压极限显著提高。比压极限与 $I/aB$ 值有关,其中 $I$ 为等离子体电流, $a$ 为等离子体截面的小半径, $B$ 是磁场强度。在Doublet III装置(DIII-D的前身)和PBX装置(在普林斯顿)上的实验证实了以下预言:发现比压随 $I/aB$ 而增大,当比压达到极限值时,观测到气球型和扭曲型不稳定性并导致等离子体破裂。

最近,在DIII-D上创造了托卡马克比压的纪录。在一稳定的D形的、有偏滤器的等离子体(截面拉长比为2:1, $I/aB$ 值为2.5)中,比压达到6.2%,比以前的实验高50%。这个比压值高于传统托卡马克所达到的比压最大值的二倍,接近于该条件下所预言的比压极限的2/3。等离子体是稳定的、约束良好的,未显示有气球型或扭曲型不稳定性。在DIII-D的进一步的实验中,将试图使 $I/aB$ 值达到4.5,使比压升高到15%。这个实验将对目前的MHD稳定性的理论模型提供一个重要的检验。

**2. 改进约束** 托卡马克的约束性能是指它保持高温等离子体的能量和粒子的能力,约束时间

越长表示约束性能越好。约束主要由等离子体中的输运过程决定，包括经典输运也包括各种不稳定性引起的反常输运。良好的约束是达到点火的基本条件之一。

苏联的托卡马克 T-8 和美国的 DIII-D 的实验表明，把等离子体的截面拉长可改善约束。借助于辅助加热手段，发现圆截面和非圆截面托卡马克中约束均随着等离子体电流的增大而改善。在新型的托卡马克中，不仅采用拉长的截面，而且由此能在高得多的等离子体电流的条件下运行，因此比相当的圆截面托卡马克具有更好的能量约束性能。

联邦德国的托卡马克 ASDEX 上采用磁偏滤器和高功率中性粒子束加热，首次表明它可达到一种具有良好约束的运行情况，称为 H-模。但 ASDEX 的偏滤器过于复杂，不适于应用到点火装置或反应堆中。在 DIII-D 上应用了简化的极向偏滤器，这种简化的极方偏滤器还可直接用于 CIT 和兼容偏滤器的聚变堆。在 DIII-D 上采用简化偏滤器以及 6 MW 的中性束加热或 0.9 MW 的电子回旋加热 (ECH) 时，演示了 H-模。H-模等离子体的密度剖面明显不同于标准放电情形，这表明磁偏滤器位形对等离子体输运的影响还是一个远未研究清楚的问题。

**3. 控制压强剖面** 新型托卡马克中利用射频 (rf) 波加热。波加热是一种典型的共振现象，可实现局域化的加热，因而能很好地控制压强剖面。利用这种效应可获得更高的比压，并且也更易达到 H-模约束。在很多托卡马克上进行了离子回旋加热研究。在苏联的圆截面 T-10 装置和在 DIII-D 上进行了高功率电子回旋加热研究，分别采用 90 GHz/4MW 和 60 GHz/2MW。利用 rf 加热技术，能够驱动等离子体电流并改变电流剖面，以利于提高比压极限和改善能量约束。

综上所述，在新型托卡马克中，采用拉长、变形的截面，高电流、简化的磁偏滤器，rf 加热与驱动电流，以提高比压极限和改进约束。这些是目前 DIII-D 研究计划的要点，并且代表了

磁约束概念的重要进展。这些成果均作为 CIT 设计的基本点。CIT 是第一台预期达到点火条件的装置，并可为物理学家提供机会去研究  $\alpha$  粒子加热的物理规律。CIT 目前的设计与 DIII-D 有相似之处，截面拉长比均为 2:1，采用相似的简化偏滤器，均采用离子和电子回旋加热。CIT 的大半径比 DIII-D 稍大些，小半径稍小些。两装置的主要区别是，CIT 的环磁场达 10 T，等离子体电流为 9 MA，分别比 DIII-D 大五倍和三倍。若假定能量约束时间的定标律继续保持为与等离子体电流成正比，则 CIT 可达到点火条件。

如果能在 CIT 中成功地获得点火条件下的等离子体，我们就达到了一个长期追求的目标，同时进入一个新的未知的物理领域。CIT 的实验结果将使我们能够进一步改进托卡马克的概念，并对实现受控磁约束聚变作为一种可能的能源而作出贡献。

## 二、激光聚变的新进展

激光聚变是目前惯性约束聚变研究中的主要途径，而且还有其它民用和军用方面的前景，因而是一个很重要的研究方向。惯性约束聚变的原理是：将燃料制成靶丸投入到一个大容器的中心，利用高功率密度的激光束或粒子束打靶，在极短的时间内产生和加热等离子体；同时由于外层等离子体向外喷射的反冲作用而使中心部分得到高度的压缩和加热，产生高温高密度的等离子体。由于等离子体及周围物质的惯性效应，这团等离子体可维持极短的一段时间（一般为毫微秒的量级或更短）。惯性约束聚变就是利用这团高温、高密度等离子体在其飞散之前的极短时间进行核聚变反应。

与磁聚变比较，惯性聚变的突出优点是省去了庞大复杂的磁场线圈系统，对反应室的真空度的要求较低，激光器或粒子加速器以及靶丸制备系统等高技术部分可以远离反应室。但另一方面，惯性聚变也遇到一些很复杂的问题。靶丸内部的燃料被外层的压强达数十 Mbar 的等离子体冕加速，它可被压缩到固体密度的

数千倍。核心点火区的半径只有靶丸初始半径的1—2%。因此,对靶丸的照射要求有极高的对称性,要控制流体不稳定性,超热电子对冷燃料的预加热要小以及要求很高的爆聚效率等。

实现惯性聚变有两种途径:直接驱动和间接驱动。直接驱动是将激光或粒子束能量直接聚焦在燃料靶丸上。间接驱动是先转化为软X射线,由X射线驱动靶丸。直接驱动因省去一个能量转换步骤,可能有较高的能量增益(增益定义为聚变能与激光束或粒子束能量之比)。理论估计表明,采用直接驱动时,激光能量为100 kJ时可达到点火条件,能量为数MJ时可使增益达到几百。在美国,目前有两台激光爆聚实验装置,一台是利用劳伦斯利弗莫尔国家实验室的Nova激光器,一台是罗切斯特大学的Omega激光器。最近,利弗莫尔的间接驱动爆聚实验使会聚比达到30以上,与一维球形模型的计算结果一致。在罗切斯特大学的直接驱动爆聚实验中,靶丸压缩后密度达到液体密度的50倍,比早些时候Shiva和Nova激光器间接驱动所达到的100—120倍液体密度稍小些。

直接驱动的激光聚变所面临的基本问题是,大型高功率激光器有不可避免的光学上的缺陷,若不采取特殊的技术措施,便无法实现对靶的均匀照射。通常的方法,是在激光输出处设置一光具组,把激光束分裂为数百或数千条位相无规的独立细束,然后使它们在靶上互相重叠。最近,NRL(美国海军实验室)提出一种简化的方案:把不相干背景引入到振荡器中而不是在激光光路的尾端引入。这种方案更为简单易行,而且适用于气体激光器(如KrF)。

直接驱动与间接驱动都曾遇到过的一个问题是,激光-等离子体不稳定性所产生的超热电子的效应。此问题是靠改用波长较短的激光来解决的,但这些不稳定性对于高增益情形的较大的等离子体是否不构成危害尚不清楚。另外,在NRL的最近的实验还发现,仅引入空间的不相干性实际上会使某些等离子体不稳定性增强,而把空间的和时间的不相干性结合起来,则有利于抑制激光-等离子体不稳定性。

在利弗莫尔的实验发现,X射线转换效率并没有过去所认为的那样高。推测在高增益情形转换效率只有50—70%,而以前的预测认为可达到90%。因此,必须重新设计间接驱动靶。一些实验结果表明,X射线转换效率部分地受激光束的不均匀性限制。

由于激光聚变取得很多新进展,以及它在民用及军用方面应用的可能性,近来对驱动器的研制重新引起了人们的兴趣。无论是用于直接驱动还是间接驱动,最适用的激光器应具有短波长和宽频带。唯一有竞争力的是KrF激光器,目前在一些实验室中正在研制。美国的洛斯阿拉莫斯国家实验室近期要装置一台数千J的KrF激光器,NRL已开始执行KrF激光器的发展计划。在日本,500 J和1000 J的激光器即将制成,正计划制造10 kJ和500 kJ的KrF激光器。

### 三、高纬度电离层结构

等离子体是物质的一种基本聚集状态,它与固体、液体、气体并列,可称为物质第四态。宇宙中绝大部分物质都处于等离子体态,但在地球上很少遇到自然存在的等离子体。电离层是与人类关系最密切的自然界等离子体之一。高纬度电离层显示丰富的、高度动力学的等离子体现象。近年来,利用地面雷达、火箭和人造卫星进行观测,为我们提供了极为丰富复杂的有关等离子体的数据。因此,对高纬度电离层的研究不仅有重要的实际意义和科学价值,而且大量的观测数据为我们提供了深入研究的依据,这是一个很值得注意的研究方向。

在地球周围离地面几十km以上,存在一个地球磁场起主要作用的区域,称为磁层。磁层呈彗星状,从地心到其突出部的距离约为地球半径的十倍,而磁尾可延伸到数百个地球半径以外。磁层中的物质以等离子体状态存在,称为磁层等离子体。由于高纬度的地磁场基本上在垂直方向,这就使得高纬度电离层与高层磁层有紧密的耦合。高能等离子体和电磁张力可沿着磁力线从外层磁层进入电离层。此外,极

区与中纬度的分界处是等离子体不稳定性与结构的一种起源, 因为这里既是极光等离子体所在处, 又是地磁场中俘获与非俘获等离子体之间的边界, 这些因素都是高纬度电离层中出现复杂的等离子体动力学现象的起因。

由于观测数据极为丰富, 要分析这些观测结果, 计算机模拟就成为越来越重要的研究工具。早期的模拟集中研究电离层结构的生长与演化, 假定结构的动力学主要是局域的, 即略去磁层其它区域的“反馈”对结构演化的影响。但是理论研究表明, 高纬度电离层中尺度为 km 量级的不规则性形成电场, 这电场能在几十秒内沿着地球磁场向上传播好几个地球半径的距离, 而磁层不规则性的增长时间约为几十秒的量级。因此, 电场使整个磁场区的等离子体与不规则性的发展在动力学上耦合在一起。

最近, 在美国海军实验室进行了二维模拟计算, 用以研究电离层-磁层等离子体的耦合对极区的梯度漂移不稳定性及速度剪切不稳定性影响。这两种不稳定性是极区电离层结构的主要机制。发现在电离层中, 当等离子体密度梯度相对于背景中性大气运动时, 梯度漂移模是不稳定的; 若等效的中性气体速度在密度梯度

(上接第 154 页)

测者的探测器, 全程长达 16 万光年。整个途经空间内的原子或分子都吸收一定波长的光, 并在超新星的光谱中留下空间吸收的烙印。由于 1987 A 是个亮天体, 能够将它的光波辐射分解为很高色散的光谱, 就这样, 在人类第一次取得的一个超新星的高分辨率光谱上, 探测到 24—40 条不同速度的窄吸收线。可以将这些吸收线丛分解为四群, 它们分别起源于超新星附近空间、大麦哲仑云中、大麦哲仑云和银河系之间的空间、银河系中的和地球附近空间的星际物质和星系际物质。视向速度为  $220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的是 1987 A 星周气壳中的物质, 视向速度大于  $150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的吸收线是大麦哲仑云的星际物质留下的痕迹。银河系晕和星系际空间的气体云的视向速度介于  $50—150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。起源于地球附近和银河系星际空间的吸收

的相反方向, 可引起等离子体密度结构的快速增长。当电离层与磁层等离子体没有耦合时, 不稳定性导致等离子体出现“丝状”结构, 沿着梯度方向高度拉长, 而在垂直于梯度的方向只有很小的宽度。电离层与磁层等离子体的静电耦合, 使得在不稳定电场驱动下运动的等离子体的数量增多。这种电离层等离子体惯性的等效增大减缓了不稳定性的增长, 并且垂直于磁场的两个方向上的结构增长的耦合阻碍了丝状结构的形成。因此, 耦合效应使等离子体中出现较为各向同性的结构。

高纬度电离层-磁层区的物理参量以及理论表明, 耦合效应对电离层结构的发展起重要作用。由这些模拟计算所得到的波谱不同于无耦合情形的谱。这个结果与最近在北极和南极由人造卫星 (Dynamics Explorer) 得到的有关等离子体密度及电场谱的资料一致。对于这种耦合区的三维模拟计算的模型正在发展中, 借此应能阐明一些二维模型中未包含的物理现象, 如平行于磁场方向的电场结构问题等。

(夏蒙芬根据 *Physics Today* 1988 年第 1 期  
第 S·63—S·66 页编译)

线的视向速度为  $0—25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过超新星的光谱分析竟能获得如此众多的有关星际空间和星际物质的信息, 这也是空前之举。此外, 除了观测到中性钠、中性钙和一次电离钙等常见的星际物质, 还首次在星系际空间发现了二次电离氧原子, 这算是超新星探测中的副产品。

到 1988 年 2 月 23 日, 超新星 1987 A 整一周岁了。对这一年中获取的大量观测资料进行全面分析和研究还需时日, 新的一年和今后若干年还有许多繁重观测任务正等待去完成。随着爆发之火逐渐消散, 超新星的膨胀气壳的变大、变薄和变得透明, 探测的重点一是 1987 A 的致密内核, 二是膨胀遗迹中的尘和气, 三是 1987 A 爆发后造成的附近天区环境的演变。大麦哲仑云超新星 1987 A 的研究热还将随着劫后余烬继续保持下去。