

高温等离子体中原子的特征谱线密集在真空紫外区。所以掠入式光栅光谱仪成为一种重要的诊断工具,一直到软X射线区才逐渐为晶体光谱仪取代。晶体谱仪实质上就是利用晶体中的原子点阵来代替光栅进行光谱分析。

在聚变等离子体中随着电子温度的提高,等离子体的韧致辐射和高电离态杂质的线辐射将有相当大的部分是处在软X射线区。这些X射线辐射引起的能量损失是高温等离子体能量损失的重要组成部分,因此从能量损失的观点来看,对X射线的监测是相当重要的。另一方面,X射线的探测和能谱分析可以用来确定等离子体的某些重要物理参数。例如,通过X射线连续谱的测量,可以测定等离子体电子温度;通过X射线杂质谱线多普勒展宽的测量可以测定等离子体离子温度;X射线测量还可以用来诊断等离子体中的杂质成份并用来研究杂质的空间分布及输运过程。因此,X射线的测量在高温等离子体诊断中起着非常重要的作用。

5. 中性粒子能谱分析

离子温度是高温等离子体的一个十分重要的参数。众所周知,参加核聚变反应的是离子而不是电子。中性粒子能谱分析是目前测量等离子体中离子温度的主要测量手段。我们知道,在磁约束核聚变装置的等离子体中心部位温度非常高,工作气体几乎完全电离,没有中性粒子。然而,在边缘区域的等离子体温度相对来说要低一些,存在部分未电离的中性粒子,器壁上也会因为解吸或溅射而放出部分中性粒子。这些能量较低的中性粒子有一部分通过多级电荷交换过程而扩散到等离子体中心的高温区域,在那里再跟背景等离子体中的离子发生电荷交换。这样一来,原来能量低的中性粒子变成能量低的离子,受到磁场的约束留在中心区域。某些原来能量高的背景离子变成了能量高的中性粒子,因不受磁场的约束而从等离子体中逃逸出来。测量出这些从等离子体中逃出的中性粒子的能量,就基本上反映了等离子体的离子温度。

图19是中性粒子能谱分析探测系统的示意图,该系统主要包括三个部分:气体剥离室、能量分析器和探测器。整个仪器处于真空状态,剥离室内充有工作气体,它的功能进行电荷交换,因此有时亦叫做电荷交换室。来自等离子体的中性粒子首先进入剥离室,跟其中的工作气体发生电荷交换而再次变成离子,这样便于进行能量分析。能量分析器通常是利用静电偏转的方法来

平行板静电分析器两种类型。前者具有一定的聚焦作用,右者的结构非常简单,两个平行板电极上加上电压形成均匀的静电场。从剥离室出来的离子进入能量分析器后受到静电场和磁场的的作用,轨道发生偏转。不同能量的离子具有不同的轨道半径,从下极板上相应的出射缝中出来,进入探测器被记录下来。最常用的探测器是通道式电子倍增器和微通道板。这类电子倍增器性能稳定,增益高,体积小,特别适合于弱离子流的测量。微通道板(MCP)实际上是由 10^4-10^7 个微型通道式电子倍增器组成的,其工作原理与单管通道式电子倍增器完全相同。它的重要特点是具有良好的空间分辨率,一般可以达到 $15\mu\text{m}$ 。它对于能量为 $2-50\text{keV}$ 的离子探测效率可以达到 $60-85\%$ 。由此可以得到中性粒子的能谱曲线。根据该曲线中直线段的斜率便可以得到离子温度。早期的中性粒子能谱探测系统只具有能量分辨能力,现在很多实验中用的中性粒子能谱探测系统同时具有粒子的能量分辨能力和质量分辨能力。

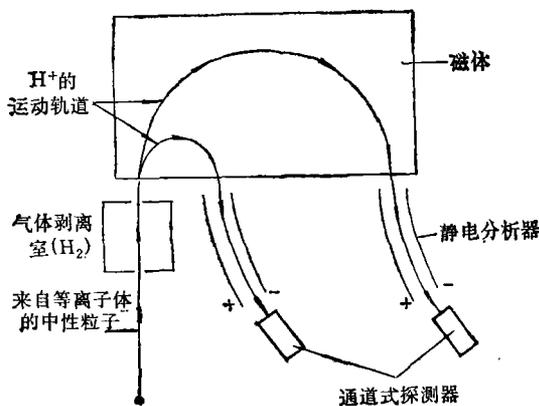


图19 具有质量分辨的中性粒子能谱探测系统示意图

七 令人鼓舞的重要进展和当代聚变研究的前沿课题

近年来核聚变研究取得了令人鼓舞的重要进展,尤其是

物质,而是它取什么形式的问题。冷暗物质在解释星系、星系团的形成方面十分有效,但用来解释我们在大尺度上观测到的成团情况时却有困难。

现在有三种选择。第一,修改冷暗物质理论,会给出大尺度上更多的结构,理论家能否令人信服地做到

这点,还得走着瞧;第二,引入新的成分,例如冷、热并用,以解释大尺度结构;最后,提出一种全新的理论,来解释所观测到的星系的成团性。目前,理论家们也正沿着这三个方向进行探索。

世界上最大的三个托卡马克装置(美国的 TFTR、欧洲的 JET 和日本的 JT-60)相继建成并先后投入运行,所得实验结果都比科学家们预想的还要好。1986年,TFTR 的 Supershot 放电创造了离子温度的世界纪录,高达 20keV,远远超过了聚变点火的要求。1989年,提高了中性注入辅助加热的功率之后离子温度进一步提高到 32keV。尤其令人兴奋的是 1991年 11月 9日在 JET 上首次成功实行了 D-T 等离子体聚变反应,创造了第一个人间小太阳(维持了 1.3 秒钟),这在人类探索新能源的科学征途上树立了新的里程碑。近年来,科学家们开始用劳逊判据 $n\tau T_i$ 值与离子温度 T_i 的乘积来判断聚变研究的进展情况。 $n\tau T_i$ 被称为聚变品质因素。目前 $n\tau T_i$ 值已达到 $4.0 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 。这些实验结果是在纯氘等离子体中获得的,由于 D-T 反应截面要比 D-D 反应截面大,因此目前的实验结果折合成 D-T

表 1 世界上目前最大的托卡马克装置

装置名称	TFTR	JET	JT-60
地点(家)	普林斯顿(美国)	卡拉姆(英国)	日本
投入运行	1982.12	1983.7	1985.3
大半径 R(米)	2.50	2.96	3.00
小半径 a(米)	0.85	1.25	0.95
纵向磁场(特斯拉)	5.2	3.5	4.5
等离子体电流(兆安)	3.0	5.0	2.7
辅助加热功率(兆瓦)	30	40	30
工作气体	H, D, D-T	H, D-D-T	H, D
特点	绝热压缩	D-形截面离子回旋加热	偏滤器,低混杂波电流驱动

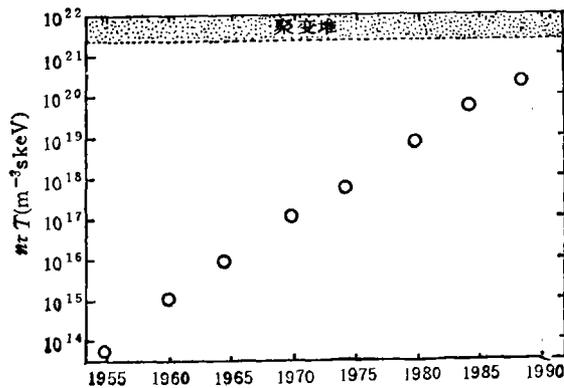


图 20 聚变品质因素的进展情况

等离子体的话,聚变功率倍增因子 $Q \geq 0.5$ (聚变点火时 $Q=1$)。图 20 画出了聚变品质因素的逐年进展情况。为了验证核聚变的科学可行性和聚变点火,当前核聚变研究的前沿课题主要包括如下几个方面:

改善等离子体的约束性能 在托卡马克等离子体中注入高能的中性粒子束可以有效地提高等离子体中离子的温度。但早期实验结果表明:随着注入功率的增加,在等离子体温度得到提高的同时约束性能却逐渐变坏。这种现象被称为“L 模约束特性”。80 年代初,在西德的中等规模托卡马克 Astex 上首次发现:当满足一定条件时,随着中性注入功率的增加,其约束性能有所改善。这种现象被称为“H 模约束特性”。1986 年在美国的大型托卡马克 TFTR 上 Supershot 放电中也实现了“H 模约束特性”。这个消息是十分令人鼓舞的,因为 TFTR 上并没有设计偏滤器。现已初步发现要实现“H 模约束特性”的关键是建立很陡的等离子体径向密度分布,即中心密度很高,边缘密度很低。因此,对边界层等离子体进行控制和调整显得十分重要。在没有偏滤器的托卡马克上必须对真空室壁和孔阑进行严格处理。TFTR 真空室内壁有一层紧密排列的石墨瓦,孔阑也是石墨做的。为了给 Supershot 放电创造条件,先以氦气多次放电(不含氘气),氦离子轰击出石墨吸附的氘气,氦气是惰性气体不会被石墨表面所吸附。这种方法效果甚好,但机制仍不完全清楚。后来在大托卡马克 JET 上也实现了“H 模约束特性”,但是提出了一个新的问题,约束时间 τ 究竟跟等离子体电流成比例还是跟等离子体电流与大半径 R 的乘积成比例,尚不清楚。此外,在 Astex 第一次获得最好的“H 模约束特性”时曾发现杂质积累效应,但在最近的大装置 TFTR 和 JET 上并未出现这种效应。

探索新的加热方法和机制 中性注入是目前最成功的一种等离子体加热方法。如前所述,离子温度的世界纪录就是在 TFTR 大托卡马克上采用这种加热方法来实现的。但是当能量很大,超过 150keV 时(估计聚变反应堆情况下要求 300keV 左右),中性注入的效率(主要是离子源中出来的离子中性化效率)急剧下降。为此,目前正在发展大功率的负离子源技术。另外,中性注入加热法所需设备庞大,结构复杂,造价昂贵,有必要探索其它新的加热方法。目前最受重视的便是射频波加热。其中电子回旋共振加热(ECRH)的关键是发展和研制大功率的高频($\sim 100\text{GHz}$)源。关于频率稍低的低混杂共振加热(LHRH)、离子回旋共振加热(ICRH)和阿尔芬波加热(AWH)的关键是深入研究波进入等离子体后到达共振区的可接近性,波在传播过程中的模式转换,共振特性以及波能量的吸收机制,加热效率等许多重要的物理问题。

反常输运和涨落现象 托卡马克等离子体的能量损失通常包括如下几种途径:对电子而言,主要有辐射损失,电子对流输运损失和电子热导损失;对离子而言,主要是电荷交换损失,离子对流输运损失,离子热导损失。这些途径的能量损失率都可以用经典的碰撞输运理论再加上环形磁约束效应进行计算。但是,大量的实验结果表明,托卡马克等离子体的能量损失率要比上述理论所预言的损失率大得多。这些用经典输运理论无法解释的物理过程便称为“反常输运过程”。由此产生的能量损失叫“反常能量损失”。一般说来,反常能量损失

中的绝大部分是由于电子热导大大增加的缘故。当然，离子热导也起了很大作用。由于反常运输的存在使等离子体能量约束时间大为缩短，只是经典运输理论预言的约束时间的百分之一左右。假如没有反常运输的话，托卡马克聚变反应堆的参数要求可以小得多，估计像 JET 这样的规模就可以了。由此可见，从理论和实验上搞清反常运输的性质、机制，并在此基础上提出抑制反常运输的方法具有十分重要的意义。目前世界各国许多科学家在这个前沿领域里探索研究。

一般认为反常运输跟等离子体中的微观湍流有关，这些湍流的空间尺度远小于等离子体半径。托卡马克中电场和磁场的涨落会引起粒子速度和位置的涨落，从而影响粒子运输。实验上已经发现静电涨落会影响边界层粒子运输。也有间接证据说明磁场涨落对反常电子热导有贡献。此外，反常运输跟密度涨落也有关系。因此，目前在许多托卡马克装置上开展对等离子体涨落现象的实验研究。采用的方法有两种类型。一类是利用电磁波散射测量密度涨落，所用的人射电磁波可以是微波，也可以是 CO_2 激光，以及远红外 (FIR) 激光。人射的微波或激光 (ω_i, K_i) 受到密度涨落的影响而发生散射。在散射角为 θ 的方向上探测散射后的微波或激光 (ω_s, K_s)。再根据动量守恒和能量守恒便可推算出等离子体的密度涨落。这种方法的优点是它不仅可探测边界层的等离子体密度涨落，也可以探测等离子体中心区域的密度涨落。另一种方法就是利用探针来研究涨落现象。它的优点是测量电场涨落、磁场涨落、电势涨落以及密度涨落，而且设备简单；缺点是这种方法一般只能研究边界区域的涨落现象。

大量实验证明，微观湍流在磁约束高温等离子体中普遍存在。然而对于它们的起源以及在反常运输中所起的作用却了解甚少，需要继续开展大量实验研究与理论物理工作。这些非线性现象极为复杂，虽有一些理论模型，但尚不能很好地解释所观察到的反常运输现象。若能尽早地从理论和实验的结合上搞清楚反常运输物理机制，那将是对核聚变研究和等离子体物理学发展的一个重要贡献。

燃烧等离子体物理特性的研究 如前所述，在 TFTR 的 Supershot 放电中最高离子温度已达到 32keV，约束性能也有很大改善。在实验中已经测量到了大量由聚变反应释放出来的中子。这标志着托卡马克中即将要达到自持的聚变反应。在这种条件下的等离子体通常称作燃烧等离子体 (burning plasma)。这与基础研究阶段的高温等离子体有许多不同的地方，某些在规模较小的托卡马克中总结出来的实验定标律以及某些理论模型在大型装置上的燃烧等离子体中不一定完全适用，或许要作些修整，甚至需要提出新的模型。

燃烧等离子体中最大的特点是含有大量的高能粒子。这些高能分量的粒子主要来自大功率的辅助加热(如高能中性粒子束注入)和聚变反应产生的 α 粒子。在 $D-T$ 点火等离子体中高能 α 粒子估计将占等离子体总压强的 10%—20% 之多。它们将会对等离子体发生实质性影响。无疑地，这些高能分量的离子对等离子体整体加热是有贡献的。但是，它们也会对等离子体的稳定性和运输过程有影响。托卡马克中很多 MHD 扰动会引起等离子体的宏观不稳定性，这主要跟等离子体的截面形状，

等离子体压强的径向分布以及磁场位形的旋转变换有关。高能分量的离子对等离子体的压力分布、温度分布、密度分布，甚至对等离子体内部的静电势都会有影响。这因素又会进一步影响到局部的等离子体运输系数。在 $D-T$ 等离子体中发生聚变反应的过程中，还必须不断地排除“聚变垃圾”氦并补充新的燃料。这又会产生新的运输现象。

对于燃烧等离子体物理特性的研究，有一部分可以进行计算机模拟，也可以在现有的大型托卡马克装置上进行研究。但是，真正解决实际问题还必须建造新一代托卡马克装置，称为点火装置。国际原子能机构早在 80 年代初就组织了各国科学家共同设计(并不打算真正建造)了一个达到聚变点火的国际托卡马克 (INTOR)。最近，国际原子能机构组织了由美国、欧洲联营、日本和苏联科学家参加的联合专家组开始设计将于 90 年代建造的第一个国际托卡马克实验反应堆 ITER。目前这个联合专家组的工作地点在德国。美国、欧洲和日本也都分别考虑各自的下一代托卡马克装置。美国经过几年来对各种方案的比较以后决定要建造一个点火托卡马克 CIT (Compact Ignition Tokamak)，其目标是使氦氖等离子体的燃烧时间达到约束时间的 10 倍左右。

高温聚变等离子体研究领域的前沿课题，除了上述四个主要方面以外，还包括抑制宏观不稳定性尤其是抑制危害性较大的大破裂不稳定性，等离子体中杂质行为及其控制，探索新的更佳的磁场位形等。

八 21 世纪的新能源——核聚变反应堆简介

受控核聚变研究的最终目的是要建造核聚变反应堆，为人类提供一种理想的新能源。为了缩短研究周期，在进行核聚变的科学可行性研究进程中就已经开始了对核聚变反应堆的研究。概括地说，这方面的研究包括两个部分，一部分是关于未来聚变堆的特殊工程技术问题的研究，如超导磁体、热核真空技术、器壁材料的耐辐照问题，氦的增殖和回收等问题；另一部分是聚变反应堆的概念设计。聚变反应堆的设计要考虑的因素相当多，除了堆芯热核等离子体参数的合理选择外，还要考虑技术上的可行性和尽可能高的效率，以及环境、安全和维修等问题。

聚变反应堆的主要部件包括高温聚变等离子体堆芯，包层、屏蔽层、磁体、辅助加热系统以及等离子体加料系统。为了使聚变反应释放出来的能量转换成电能，还必须有热交换系统和发电系统(如图 21)所示。

高温等离子体堆芯是聚变反应堆的核心部分。 $D-T$ 等离子体在这个区域里发生聚变反应，输出功率跟等离子体密度平方成正比。在设计聚变堆过程中选择堆芯高温等离子体参数时要综合考虑到磁场、等离子体电流、密度以及几何尺寸等

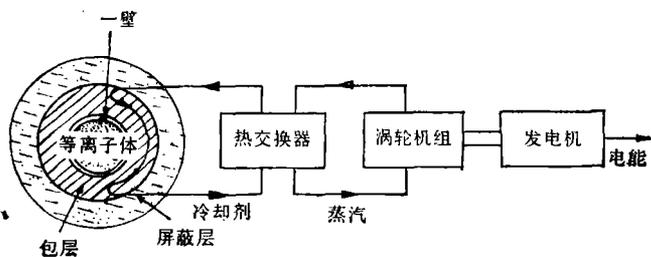
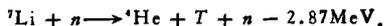


图 21 核聚变反应堆的主要部件和流程示意图

许多相互制约的因素。

直接面向高温等离子体的是等离子体反应室的第一壁。它不但承受 14MeV 的高能中子的轰击，还受到电磁辐射以及从等离子体扩散出来的带电粒子以及在等离子体中通过电荷交换产生的快中性原子的轰击。因此，在聚变堆设计中，对第一壁材料的性能提出了严格的要求。它必须能够承受很高的表面加热率。核聚变反应堆中，14MeV 的高能中子通量相当大，估计第一壁可能经受的中子通量大约为 4.43×10^{13} 个中子/厘米²·秒。第一壁表面热负荷大约在 5W/cm² 到 200W/cm² 之间。另外，由中子、带电粒子及快中性原子引起的第一壁原子溅射不仅引起第一壁材料的辐射损伤，而且也会产生重杂质返回到等离子体中，影响等离子体的约束性能和造成辐射能量损失。

在高温等离子体堆芯中发生的每个 D-T 反应可以释放 17.58MeV 的能量，其中 14.06MeV 的能量是由中子所携带。这些中子不受磁场约束，会从磁约束等离子体区域内逃逸出去并穿透第一壁。为了利用聚变反应释放的能量，必须设法回收这些中子携带的能量。为此，在高温等离子体堆芯外面设计了包层。从等离子体区域逃逸出来的中子在这里通过跟结构材料以及冷却剂发生碰撞而慢化，同时能量被取出。载热的冷却剂再通过热交换器以及功率循环来发电。一般来说，中子能量的 95% 沉积在包层区。但因中子是贯穿辐射，由中子引起的核反应发出的 γ 射线穿透能力很强，因此在包层外还需要设计辐射屏蔽层。这个屏蔽层在采用超导磁体时尤其重要。一般来说，屏蔽层的厚度在 0.5—1 米之间，这个屏蔽层可以使能量通量再衰减四个数量级。包层的第二个主要功能是增殖聚变燃料氚。我们知道，自然界没有天然存在的氚，因为氚的放射性半衰期为 12.35 年。因此就需要采用高能中子和锂发生反应来增殖氚。天然锂有两种同位素。⁶Li 占 7.42%，⁷Li 占 92.58%。通过中子和锂来产生氚的核反应可以表示为：



上述第 1 个反应是释热反应，第 2 个反应是吸热反应，即只有当入射中子的能量大于 2.87MeV 时才会发生。在以 D-T 为燃料的聚变反应中，氚的增殖问题具有十分重要的意义。将产生的氚原子与 D-T 燃烧中消耗的氚原子数之比称为氚的增殖率 B，显然，实用的聚变反应堆要求 B 大于 1。用来增殖氚的金属锂在自然界中储量相当丰富。地壳中锂的储量大约是铀的 16 倍，海水中锂的浓度为 0.17 克/厘米³，大约是海水中铀的 1/200。用作氚的增殖材料锂可以分为三类：液态锂；合金锂；锂的氧化物。

现在我们简单讨论一下关于用冷却剂提取中子能量的问题。包层中所用的冷却剂可以采用气体、水或液态金属。气态冷却剂主要是氦气。在裂变反应堆中也采用氦气作冷却剂。氦是惰性气体，不会像其它冷却剂那样发生有害的化学反应。这是用氦作冷却剂的突出优点，它的另一优点是热电转换效率高，但要求的出口温度比较高，大于 400℃，给包层材料的选择带来了困难。另一类可供选择的冷却剂便是压力水，如 H₂O 或 D₂O。在这方面裂变反应堆已积累了相当丰富的经验。在水作冷却剂的情况下比较合适的包层材料是不锈钢。锂和其它液态碱金属也是良好的冷却剂，在较低压力

下冷却效果很好。如果用锂或者含锂液态共晶体作冷却剂的话，同时还起到了氚的增殖作用。这种冷却剂遇到的问题主要是对结构材料的腐蚀问题，跟水和空气发生化学反应，以及熔点比较高等。

如果在高温等离子体堆芯外边的包层中装有铀-238 或钍-232 等材料的话，那么由 D-T 反应产生的 14MeV 的中子可以使铀-238 嬗变为较重的元素钚-238 或钍-233。这两种物质是能够进行裂变反应的，将它们分离出来就可以作为裂变堆的燃料。在这样的包层中还进行一定数量的裂变反应。这样一种在堆芯区发生聚变反应，在包层中进行裂变反应的系统称为聚变-裂变混合堆。在这种混合堆中除了可以增殖十分重要的裂变材料之外，还会由于发生一部分裂变反应而增加能量输出，由此可以降低对实现聚变点火条件的要求。

综上所述，核聚变研究是当代物理学的一个重要前沿领域，近年来已经取得了令人瞩目的重要进展。尽管尚有许多复杂的问题有待进一步的探索研究，但是，离最终目标的实现已经为期不远了。最终目标的实现不仅取决于高温等离子体物理学的深入发展，同时也要依靠各种新技术的发展。预计在世纪之交将会建成可以发电的核聚变反应堆，在 21 世纪的 20 年代左右核聚变发电站将正式登上世界能源舞台。此后，浩瀚的大海将成为核聚变电站取之不尽用之不竭的原料仓库，人类再也无须担忧能源危机的出现。可以说，核聚变研究的成功，不仅是科学史上的一件大事，而且必将在人类文明进程的史册上写下光辉灿烂的一页。

(全文完)

愿心中物理大树硕果累累

西安交大物理系主任 王永昌



寄语我的学生

大学里的几门物理基础课是你们今后开拓理论和应用研究的基础。要选择好的合适的参考书，通过独立钻研、透彻理解物理学的基本规律，把物理大树的根扎深扎牢。

要善于从实验观测或书本中捕捉问题，不断地去探求问题的答案，切忌一知半解就停顿下来。真知灼见往往是深厚的根底与执著的探索相碰撞所

迸出来的火花。

同学们：只要你们心中的物理大树不枯，勤劳的汗水定会浇灌出硕果累累。

·小知识·

中国物理学会历届理事长

1. 李书华(1932~1934);
2. 叶企孙(1935, 1946~1947);
3. 吴有训(1936~1945);
4. 严济慈(1948~1949);
5. 周培源(1950~1982.12);
6. 钱三强(1983~1987.3);
7. 黄昆(1987.3~1991.3);
8. 冯端(1991.3~)

(汪雪瑛)