

72.36
ZKJ
1

受控热核反应

第一集

科学技术文献出版社重庆分社

毛 主 席 语 录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

洋为中用。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

前 言

受控热核反应的基本目标，就是研究用人工控制的方法，使原子核聚变反应（即氢弹的爆炸反应）产生的巨大能量，以非爆炸的形式释放出来，驯服地为人类作功。这个目标如果实现，在人类历史上，将象火、蒸汽机、电力的发明和利用一样，对生产力的提高，带来革命性的变化。

近年来国际上在受控热核反应研究方面发展很快。为了使我国在受控热核反应和高温等离子体物理研究领域内，迅速接近和赶上世界先进水平，我们遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，编辑出版了这本《受控热核反应》（一），以供参考。

本专集共收集八篇文章，其中六篇均选自“第四次日内瓦和平利用原子能国际会议”资料，重点介绍苏联、美国、英国、法国和西德等国受控热核反应方面的进展情况。

由于水平所限，本刊在编译出版方面定有缺点和错误，殷切希望读者提出批评和建议。最后，对有关兄弟单位的大力支持和帮助，一并在此致谢。

目 录

受控热核聚变的评论报告.....	(1)
苏联受控热核聚变的研究.....	(6)
美国受控热核研究的进展.....	(15)
英国受控热核反应堆研究的进展.....	(28)
法国原子能委员会受控热核聚变的研究.....	(38)
德意志联邦共和国受控热核研究现状.....	(46)
用激光将物质压缩至超高密度.....	(51)
——对受控热核反应堆的应用	
全苏等离子体理论会议.....	(57)

受控热核聚变的评论报告

〔苏联〕Л. А. Арцимович

摘要：本文探讨了获得用于热核反应堆燃料的高温等离子体的方法。综合了托卡马克和仿星器环形装置的主要实验结果以及等离子体平衡和热绝缘的理论工作。估计了这种系统用于建造热核反应堆的前景和对这种系统采用新的等离子体加热方法的可能性。叙述了在开端磁捕集器中的等离子体研究数据。探讨了抑制槽纹型不稳定性的“min H”系统，但未发现高密度时理论上预计的圆锥型不稳定性。概述了用反馈方法来稳定等离子体的不稳定性，用中性原子注入捕集器以及在开端系统中的湍流加热等方面的工作。叙述了动力学稳定和用高频场加热等离子体的实验结果。讨论了“等离子体聚焦”和“等离子体压缩器”系统的热核聚变的远景。分析了不用磁绝热而用激光器以及脉冲电流为 10^9 安培的强电子束产生等离子体的方法。

在我们的时代，对受控热核聚变的研究仅仅是为创立新的原子技术的序幕，这种新技术能使我们的后代掌握实际上取之不尽的最轻物质的核能源。

自从苏联和美国最初简单地尝试在实验室里制备新的核燃料——高温氘等离子体的时候起，已过去将近二十年了。在这期间，各国许多研究所投入了受控热核聚变的研究。研究的课题是相当广泛的，并具有深入的系统的科学分析的特点。但是，与原来预期的相反，受控热核聚变的研究竟是如此困难，以致于目前仍处于纯物理研究的范畴。距离确定的实际目标还非常遥远。今天与过去一样，主要任务是在实验室中继续进行获得高温等离子体方法的研究，这种等离子体的参数对于产生热核反应的能量利用是必不可少的。在最佳情况下，对同等分量的氘氚混合物来说，如果等离子体的离子温度 $T_i > 10^8$ 度，离子密度 n_i 和等离子体热能的平均保持时间 τ 的乘积超过 10^{14} ，才能在热核聚变中有盈余能量的释出。这是对最好的热核燃料（氘氚混合物）提出的最低要求，目前任何一个试验装置都没有达到这些要求。但是，我们用几种不同的途径逐步接近实现这些

要求，以便达到预定的目标。

多年来，磁约束（有时也用“磁绝热”这个术语）高温等离子体的概念是研究受控热核聚变的主导概念，这个概念已成为研究的许多基本途径的源泉，现在，这些途径可以称为“传统途径”。

下面对在这些途径中所取得的进展作一总结。

在所谓封闭磁系统内得到高温等离子体的实验在整个研究计划中占主要地位。在这种系统中等离子体沿着约束它的磁场的磁力线能够自由流动，并采取环的形状。如果我们可以这样来表达的话，在这些装置上我们以最小的压力作用于等离子体的带电粒子上，使带电粒子只能够在与磁场垂直的方向上运动。

托卡马克和仿星器是封闭系统装置的主要类型。

托卡马克，按其几何位形来说，是比较最简单的一个系统，它具有平行于等离子体环的强纵向场并由通过等离子体本身的电流来加热灼热等离子体。

托卡马克装置的主要特点如下：

1. 容易得到大横截面等离子体环的磁场的

轴向对称；

2.由沿等离子体环通过的电流所产生的磁场分量强度比较高。这个磁场分量在保证很高温度下等离子体的绝热中起着主要作用。

一九七〇年以前，托卡马克的研究工作只在莫斯科原子能研究所里进行（一九六九年夏天一个英国物理学家小组参加了这一工作）。目前，美国、法国、西德的许多实验室也已投入了这方面的研究。

第三次日内瓦会议以来的七年中，在托卡马克装置上等离子体的主要参数已显著提高，离子的温度增加了一个数量级。目前，氘的 T_i （离子温度）最大值已达到 $\approx 8 \times 10^8$ 度，决定绝热效率的 $n\tau$ （等离子体密度和约束时间的乘积）也增加了将近一个数量级，为 $\approx 0.5 \times 10^{12}$ 。这些进展是在主要实验装置的大小没有改变的情况下取得的（只增加了纵向磁场的强度和等离子体中电流的强度）。

可以期望，最近四~五年内，在较大的装置上离子温度和等离子体中能量保持时间至少可以提高到五倍。如果我们目前关于托卡马克系统中等离子体的行为和高温状态的概念是正确的，而此时等离子体中粒子之间的碰撞很少，上述期望就可以实现。

进一步提高等离子体的参数，只有向在大装置上利用强度为10—20万奥斯特的纵向磁场过渡，才有可能。研究等离子体加热的新方法可能对此有重大帮助，因为提高温度时，电流通过等离子体环的焦耳损失会越来越减少有效的热能源。

还应该指出一点：虽然用托卡马克做实验已有许多年了，但还不能说，已经找到了最佳等离子体环的几何形状。并不排除，为了改进主要物理参数，大大改变等离子体横截面的形状或者增加辅助控制场，今后是适宜的。这对于随时间变化的电流脉冲形状的放电过程，也是正确的。电流脉冲形状具有重要意义，因为由于趋肤效应，电流强度对时间的变化关系影响整个系统的磁场结构。现在断言，对托卡马克最后确定一个最佳的工作状态，为时尚早。这方面的研究将继续进行。

仿星器的磁结构比托卡马克更微妙，它的

优点在于，没有强电流通过等离子体环也可以产生等离子体的磁约束。美国普林斯顿实验室最早开始仿星器的研究，随后，英国、西德和苏联也开展了这方面的实验。

在仿星器上进行的研究，由于这个系统的复杂性，在时间上有所延迟，但是，从近年来得到的实验结果可以推测，在不久的将来仿星器将成功地获得 T_i 和 $n\tau$ 值很高的灼热等离子体。可能，此时这种类型装置的最初几何比例需要作某些改变，以便使等离子体环的截面最大限度地扩大和提高磁场横向分量的强度值，来保证等离子体的热绝缘。

下一个热核研究规划的传统部分，就是制定在所谓绝热磁捕集器中获得等离子体的方法。这种类型的装置不仅把粒子约束在与磁场垂直的方向上运动，而且由于“磁镜”的反射使粒子沿着磁场运动。磁镜就是被提高了磁场强度的区域，在该区域内，使磁力线稠密。在绝热捕集器中充满磁镜间空间的灼热等离子体可以用各种不同的方法获得，其中在原理上最好的一个方法是外注入快速粒子。

这项热核规划研究工作，经历了悲喜交加的几个阶段。实验结果，经历了长期的互相矛盾的初始阶段之后，于一九六一年找到了稳定约束磁镜系统中等离子体的第一个必需的判据，这就是所谓“最小B值原理”，根据这个原理，绝热捕集器的磁场强度应在等离子体所占的区域的各方面都有增加（事实上，这个条件，对改变了磁场位形的封闭系统，也能满足）。只有根据上述原理设计实验装置之后，绝热捕集器的研究工作才走上正确的轨道。

第三次日内瓦会议（一九六四年）以前，磁镜捕集器的等离子体参数有以下数据： $T_i \approx 1.5 \times 10^7$ ， $n_i \tau \approx 1 \times 10^9$ 。现在最好的值为： $T_i \approx 6 \times 10^7$ ， $n_i \tau \approx 0.7 \times 10^{10}$ 。但是，甚至在最好的条件下，把等离子体密度提高（ $\sim 10^{18}$ 粒子/厘米³）时，它的蜕变率仍然超过它在完全稳定状态下应有的值至少几倍。

鉴于这种情况，如果能成功地制订非常有效的方法，使等离子体通过磁镜损失的电子和离子能量得到回收，那么，只有在这种条件下，在所研究的这种类型的系统中，才能满足

判据 $n\tau > 1 \times 10^{14}$ 。用快速粒子流的专门注入器使这种能量回到等离子体。在封闭的循环过程中, 能量再生的效率应接近98—99% (即注入器的功率将超过反应堆的有效功率几十倍)。我们发现, 甚至对完全稳定的等离子体, 再生的效率也应在90%以上。

近年来提出了各种能量再生的方法 (其中包括很巧妙的方法), 但要判断它们的效率, 为时尚早。绝热磁捕集器在美国、苏联、法国等许多国家仍然是受控热核聚变科研规划的一个重要部分。显然, 在最近若干年内, 关于这个途径的远景会有一个非常明确的概念。

到目前为止, 我们谈论的是关于建造用于磁约束高温等离子体装置的原理问题, 这高温等离子体在稳定或准稳定状态中能保持足够长的时间。我们理解的准稳定是指作用于等离子体的力是平衡的, 即等离子体的压力在任何时候都被磁压差抵消。除上述两种系统外, 在受控核聚变的研究计划中, 在非稳定状态中获得灼热等离子体的方法具有重要意义。在这种情况下, 我们从静力学转到动力学; 起重要作用的是被可变磁场加速的等离子体的惯性力和与此有关的冲击波的形成。

在脉冲磁场内等离子体快速加热的各种方法中, θ -箍缩的研究进展最快。所谓高密度等离子体柱, 它是在长直线管内形成的, 管中产生一个均匀轴向磁场, 它在几微秒内增加到很高的值 (几万或者几十万奥斯特数量级)。脉冲磁场把直线管内最初产生的冷等离子体压缩, 并迅速加热。在这种脉冲过程中比较容易获得密度为 10^{16} 粒子/厘米³, 温度为 10^7 度数量级的等离子体柱。在 θ -箍缩中热能保持的时间随着系统的延长而增加。

美国洛斯-阿拉莫斯实验室和英国卡拉姆实验室对研究 θ -箍缩的贡献最大。从上次日内瓦会议以来, 研究获得物质高温状态方法的进展首先在于, 在足够长的系统内相当长时间保持磁绝热已得到证实。目前, θ -箍缩类型系统的最好参数为 $T_i \approx 5 \times 10^7$, $n\tau \approx 2 \times 10^{11}$ 。

为避免直线系统中的开端能量损失, 初次尝试过渡到封闭环形系统。为了保证环形等离子体柱的平衡和宏观稳定, 必须使外磁场的结

构复杂化。最近二、三年的实验表明, 这种尝试多少是成功的。这些实验成功的结果意味着, 在经济地利用强磁场情况下, 为产生准稳定的高温、高密度等离子体位形开辟了前景 (θ -箍缩的等离子体压强和磁场压强的比值, 要比托卡马克的大得多)。

这里要适当强调一种情况: 除了要保证等离子体大幅度变形的稳定和平衡外, 由扩散和热传导引起的能量损失, 应在允许极限范围之内。只有在这种条件下, 环形 θ -箍缩预期的优点, 才具有现实意义。宏观稳定性的存在本身对长期保持等离子体的能量是不够的。既然可以预料, 在封闭磁系统中扩散和热传导首先应取决于磁场的横向分量, 所以, 必须使这些分量具有很高的值, 同时, 必须使等离子体环的截面半径不至于太小, 因为 τ 值与这个半径的平方成正比。满足环形 θ -箍缩的这些条件是一个不容易的课题, 但是, 高密度等离子体可能在这方面起良好作用。

各国实验室在研究上述得到高温等离子体的“传统”方法时所化费的巨大劳动的成果在附图一上示出。这里 T_i 和 $n\tau$ 值是对数座标。划有阴影线的区域大致符合于能释出盈余能量的 (氘氚混合物) 聚变反应点火所必需满足的判据。这就是“热核黄金国”——为创立新的原子动力而努力奋斗的人们的美好理想。箭头表明了近几年内按照各种科研计划达到这一目标的进展情况。每个箭头的始点对应于一九六四年达到的 T_i 和 $n_i\tau$ 参数的值, 而箭头的尖表示这些参数的现在值。为了正确起见, 应该说, 我们选择的划有阴影线区域的边界是以十分乐观的估计为基础的。如果由于某种技术原因, 在列举的任何一种方法中难以使用氘氚混合物 (氚需要还原), 则对这种方法, 边界将移到上右方 (见图一)。

由于时间不够, 关于用产生所谓“等离子体聚焦”的装置做实验, 只能说几句话。“等离子体聚焦”是在一个不太大体积中的高温、高密度 ($10^{18} - 10^{19}$ 粒子/厘米³) 等离子体团块。它是用通过等离子体的电流的磁场压缩等离子体时产生的, 存在的时间 $\sim 10^{-7}$ 秒, 并可用作高强度脉冲中子源。等离子体聚焦——这

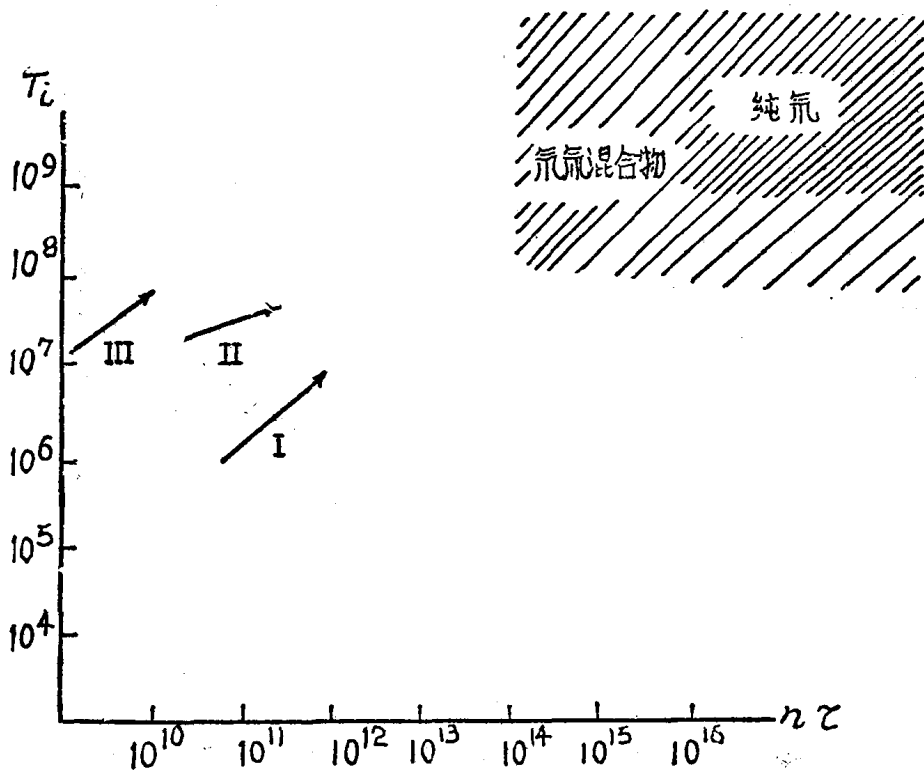


图1 第三次和第四次日内瓦会议之间的这个阶段中，各种类型装置上等离子体参数的变化情况。I—托卡马克；II—θ-箍缩；III—磁镜捕集器。

在目前是实现最短延续过程方面的磁绝热的极限位形。苏联、意大利和美国都在进行这种途径的研究。近几年来，通过改变实验条件的办法，来弄清楚等离子体聚焦的中子辐射机制及其与各种物理参数的关系，可惜，在这方面的的工作做的还很少。这个过程的时间值仍然不定，以致难以估计其未来的前景。

最近十年来，由于实验物理的新领域和新方法的迅速发展，在原则上可以朝物质加热的极短过程（直至最小的时间间隔）方面大大地向前推进，到那时，使用磁绝热已经不起决定性的作用了。这里我们首先要谈到，用大功率脉冲激光加热高密度物质的可能性。此法是使激光器的光在很薄的氙靶表面上聚焦成直径为几百分之一毫米的斑点（在实验中也使用氙的化合物）。

大多数实验的数据已公布，光脉冲的延续时间不超过 $\sim 10^{-8}$ 秒，它的功率为 $\sim 10^{13}$ 瓦/厘米²。在光脉冲的作用下，靶的照明部分迅速烧热，因此，在过程的初相中， $\sim 10^{-9}$ 秒的时

间内，形成了超高温度的等离子体，其温度迅速提高到最高数值。光能在等离子体的薄层中被强烈地吸收，并在这个薄层中满足共振的条件（与等离子体密度平方根成正比的等离子体振动的频率接近于入射辐射的频率）。由于灼热等离子体的导热率很高和冲击波的形成，热能迅速地在靶内传开，从而烧热密度更高的等离子体区域。由于很快地供给能量，高密度物质在向各方散逸和在垂直

于光线的方向上靶的热传导起作用之前，它就被加热到 $\sim 10^8$ 度。

苏联进行的激光加热物质的实验，于一九六八年首次测到中子，这些中子是在氙化锂靶内发生热核反应时产生的，以后在里曼尔工作的法国物理学家得到了每脉冲为 10^5 个中子数量级的中子辐射强度。目前，激光加热过程的研究规模很大，近年来，这种研究已成为研究受控热核聚变的一个主要途径。

这个途径的前景首先取决于提高激光源本身效率的进展，脉冲激光器的动力效率暂时还很低。所以，希望用这个新方法达到 T_i 和 $n_i\tau$ 所要求的值还过早。对此需要补充一点，激光加热的实验还处于最初的阶段。这些实验目前还不能提供足够的资料，来检验和说明激光加热过程的理论结论，它还具有很大的选择性。因此，我们没有足够的根据来预言，对主要物理参数达到所要求的水平，需要多大的光脉冲功率。我们刚才讲过的情况，对于主观预测将来如此引人入胜的物质加热方法，留有广阔的余地。预先不能排除，不用磁绝热（具有几十兆奥斯特数量级的脉冲场），结果仍然不行。

最近，产生了一个超快脉冲加热物质到热核温度的新方法，在这个方法中，作为初始能源的是电流强度很高的相对论性电子流。基本概念如下：在良好聚焦的电子束作用下，在固体靶内部形成充满等离子体的孔道之后，电子流与物质相互作用应急剧改变特性。电子流将强烈地激动等离子体振荡。所以，快速电子能量的损失增加了许多倍，损失的能量应有效地加热等离子体。在这个方法中，初始能源——电子脉冲注入器的效率至少为百分之几十。因此，如果关于电子反常韧致的理论预测得到证明，用相对论性电子流加热物质的方法对今后的发展大有希望。同时，还应克服在电流强度 $\sim 10^9$ 安培时电子束聚焦的困难。现在，苏联和美国已开始研究电子加热物质的方法。

由于时间不够，我不得不放弃叙述在高温等离子体物理学方面所做的许多实验和理论研究的非常有益和重要的成果。这些研究有助于奠定热核聚变的科学基础。这就是英国、法国、瑞典和美国进行的多极研究，苏联和法国进行的约束等离子体和用高频场稳定等离子体的各种不同方法的研究以及对定向快速粒子束与等离子体相互作用的研究等等。

我们观察了受控热核聚变方面科学研究的一般图景，可以确认，最近几年内，在许多“传统”途径方面继续不断地取得了进展；此外，还产生了为解决问题而开辟新途径的有益概念。这种进展在历史背景上特别显著。

在一九五八年的第二次日内瓦会议上，对热核聚变的问题呈现出富于创造性的想像以及由此而产生的广阔的美好设想。只有充满热情的物理学家，坚信未来科学的新胜利，那么，这些设想才能得到证实。

然后，在实现最初想法中遭到一系列挫折之后，在各方面都发生了退却现象，而对灼热等离子体的物理问题开始了认真地研究。

第三次日内瓦会议的参加者可以证实新热潮的开端——在与灼热等离子体最危险的不正常状态（大规模磁流体动力不稳定性，它能完全破坏磁绝缘作用的机制）作斗争中取得了初步成就。但这还是很简单的开端。

现在，已在更高的阶段上研究这个问题，

克服有害的不稳定性已成过去。物理学家学会了获得长的持续时间内发生热核反应的稳定等离子体（强度暂时还不高）。

下一阶段（预定五~十年）应该最后达到能量输出要求的温度和 $n\tau$ 乘积的值。目前很难预料，在上述列举的方法中，究竟那一种方法能最快达到这个目标，因为其中任何一种方法都有其弱点，现在还没有找到通向未来热核动力的“光明之路”。

当然，这种状况不利于热核技术工程问题的基础研究的开端。由于现在所研究的方法的多样性，未来热核反应堆的轮廓很难确定。现在所讨论的反应堆的各种方案，彼此之间的差别，要比宇宙火箭喷气发动机与汽车发动机之间的差别还要大。只有一点是非常可能的：即这种在外面用设备围起来的反应堆绝不是微小型的。

在像托卡马克，仿星器或者环形 θ -箍缩的准稳定系统中，用于聚变反应点火的灼热等离子体中产生的初始能量储备应达到 10^9 焦耳。以绝热捕集器为基础的反应堆将备有功率不小于几百万千瓦的快速粒子注入器和供回收从等离子体中逸出的离子和电子的能量用的体积很大的设备。假如超快速加热等离子体的方法提到首位，也未必有希望在技术上就容易解决问题。在这种情况下，能量的释出往往带有爆炸性质，虽然这种爆炸的本身因物质的质量小而不危险，但是用氘氚混合物工作时，氚的再生会发生很大的困难。所以，可以明确，不得不转到使用纯氘，而它把所要求的值立即提高到 $n\tau \sim 10^{16}$ ， $T_i \sim 10^9$ 。

尽管有上面提到的反应堆的不确定性和预料会遇到各种困难的忧虑，但是，美国、苏联、英国和其他一些国家正在开展热核聚变工程技术问题的研究。目前，在第一个计划中有两个主要的技术问题：

1. 选择反应堆真空室（其中产生灼热等离子体）壁的材料。这种材料必须满足许多很严格的要求，其中最困难的是要求能耐强中子流和等离子体快速带电粒子的轰击。

2. 再生热核聚变过程中损耗的氘。

（下转第37页）

苏联受控热核聚变的研究

〔苏联〕Л.А.Арцимович

摘要：苏联在受控热核聚变领域进行的理论、实验与工程研究计划可分以下几个主要方面：

1. 研究在封闭磁系统中获得高温等离子体的方法；
2. 磁镜捕集器中高温等离子体的产生；
3. 用“等离子体聚焦”方法产生高离子温度的密等离子体；
4. 研究等离子体与高频场相互作用的过程，以寻求加热等离子体和消除其不稳定性的方法。

上述第一方面的代表性工作为：库尔恰托夫原子能研究所在托卡马克装置上进行的研究和哈尔科夫技术物理研究所与莫斯科列别捷夫物理研究所在仿星器上进行的研究工作。托卡马克装置上进行的实验进展最大，在该装置上等离子体环由通过它的电流加热，并使用一个强纵向磁场来抑制不稳定性。在托卡马克装置上能够产生电子与离子温度高、热能保存时间长的稳定等离子体。仿星器计划的研究工作正处于查明等离子体能量与粒子流失的基本机制的阶段。一系列描述等离子体输运过程与磁场的几何形态之间关系的定律已被确定。表明，在最佳状态下，仿星器内等离子体的热能保存时间，可以大大超过由熟知的博姆公式所确定的值。对磁镜捕集器内等离子体行为的研究（这方面的工作是由库尔恰托夫原子能研究所进行的）表明，当满足“极小B值原理”时，等离子体是宏观稳定的，而粒子逸出率看来基本上取决于经典的双碰撞机制（虽然这种假设还不能认为已被完全证实）。中性粒子注入器的研究取得了很大进展。此种注入器有可能用于上述类型的磁捕集器以产生灼热等离子体。依靠过程的强化（增加温度和密度）而使等离子体聚焦的脉冲系统中中子产额大大提高。正在研究各种产生轴对称的会聚等离子流的方法，在理论上说，可以在这种等离子体内形成等离子聚焦型的准稳压缩。研究等离子体与高频场之间的相互作用时，注重研究准稳定系统中等离子体的电子和离子成分的加热方法。库尔恰托夫原子能所、哈尔科夫技术物理所和列宁格勒技术物理所等单位在进行这方面的研究。苏霍姆斯基物理所和列宁格勒电物理仪器科研所在继续研究用高频场稳定等离子体的方法。除进行高温等离子体的物理研究外，苏联许多研究所还探讨了未来热核反应堆的各种工程设想。

利用核聚变反应产生动力的问题，至今仍处于建立科学基础的准备阶段，而未来热核反应堆的工程研究必须建立在此基础上。这个阶段要到以氘或氚与氦的混合物为新的核燃料的方法研究成功之后才能完结。这样的燃料应当是高温等离子体，它要满足两个基本要求：

1. 等离子体温度（或更确切地说，等离子体的离子成分的温度）应为 $\sim 10^4$ 电子伏的数量级，即 $\sim 10^8$ 度；
2. 等离子体内的热能应保持足够长的时间，须满足 $n\tau > A$ 的条件，式中 n —等离子体密度（每立方厘米的电子数）， τ —保持能量的

平均时间（热能储存与等离子体热通量之比）。常数A与核燃料的成分有关。在最佳情况下，对于纯氘A为 $\sim 1 \times 10^{16}$ ，而氘氚混合物（两种成分含量相等）约 1×10^{14} 。

但是，迄今还没有一个实验能同时满足上述两个条件（这里我们未涉及热核爆炸，其爆破能量实际上难以足够高效率加以利用）。然而，可以断定，等离子体的物理参数，将一年一年地提高。

几乎所有产生高温等离子体的方法都是以磁绝热概念为基础的。这个概念的实质是将等离子体置于强磁场中。通过对磁场位形的选择，使等离子体的电子和离子只能沿磁力线作相对自由运动，而不开被限定的预定充满等离子体的空间区域。在此情况下，传到等离子体容器壁上的能量可能（至少在理论上）降低好多个数量级，亦即热能将很好地保存在等离子体内。

有几种实现磁绝热概念的方案，它们形成热核聚变领域内主要的竞争方面。近年来，由于出现用大功率光流和电子流超快速加热物质的新建议，这方面的范围又有所扩大，而磁绝热甚至可能成为不必要的了。目前还不能对解决受控热核聚变这一任务的各种途径作出最后的选择，也不能指出那一种方向最有前途，应当集中最大力量。所以，最近这几年，科学研究计划的面仍应广些。在苏联，虽然各项研究工作的力量分配逐步改变，但这个规划的主要部分很早就确定了。

近几年苏联在两个方面进行了最紧张的研

究：

1. 封闭（环形）磁系统中产生高温等离子体的方法的研究；

2. 开端“磁镜”系统中高温等离子体性质的研究。

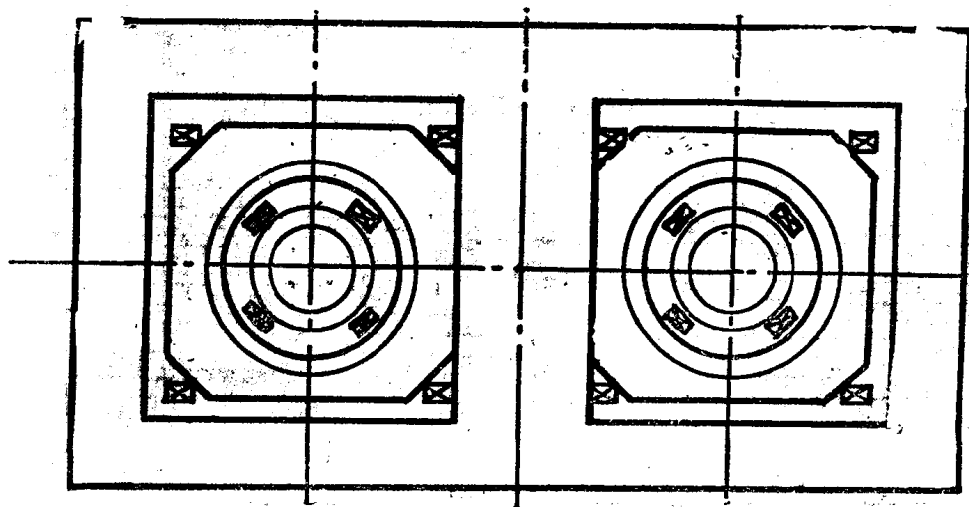
高频电磁场与等离子体相互作用的研究也给予很大的注意。此外对产生所谓“等离子聚焦”的过程继续进行了研究。所谓“等离子聚焦”是一种高温等离子体的很致密的凝块，它是在通过等离子体的电流的磁场对等离子体本身进行快压缩的最后阶段形成的。

不久前，热核计划中开始了一个新的方向。这里所指的是用极大功率的激光脉冲将物质加热至超高温，因为激光脉冲的持续时间极短，所以绝热加热已失其意义。

现在来看一看总规划中上述各部分研究的基本结果。

在封闭磁系统中，等离子体能在限定空间区域内沿磁力线自由流动。等离子体产生于环形真空室内，并成园环形。托卡马克装置是建造这种系统的基本方案之一。在这种类型的装置内高温等离子体处于准稳定条件下，感应产生的电流沿环形等离子体流动。这个电流的磁场对保证等离子体的磁绝热起着主要的作用。等离子体的加热则依靠电流所产生的焦耳热。

为了克服强电流流过时等离子体本身所固有的破坏性不稳定性，采用了一个外加纵向磁场，它的磁力线与电流平行。纵向磁场的强度H应较电流磁场的强度 H_{ϕ} 大许多倍。纵向磁场由布置在环形真空室外面的线圈（图1）产



图一 托卡马克装置示意图

生。等离子体环内的磁场是两个磁场的叠加，故其磁力线具有螺线形态（图2）。因 $H_z > H_\theta$ ，故磁力线沿环强烈拉直。

图3所示为目前正在运行中的最大的托卡马克装置T—4，它是今年建成的。实际上这个装置是前一个装置T—3的改进。T—4的环形真空室直径为1.8米，等离子体环的截面直径可达36厘米。在环形真空室的内壳里——即内真空室的内壁有孔阑，它能限制等离子体环。内真空室由薄的不锈钢波纹管焊成。真空

室外壳用厚铜板制成。线圈在等离子体环轴线上产生的纵向磁场的最大强度约为 ~ 50 千奥斯特。

对于上述H最大值来说，等离子体内的极限电流不要超过 ~ 300 千安，可以保持其稳定性。为了激发等离子体内的电流，采用了一个铁制变压器，环形真空室则套在它的铁芯上。电流脉冲持续时间可在几百分之一秒的范围内变化。

采用了各种等离子体诊断方法来研究等离

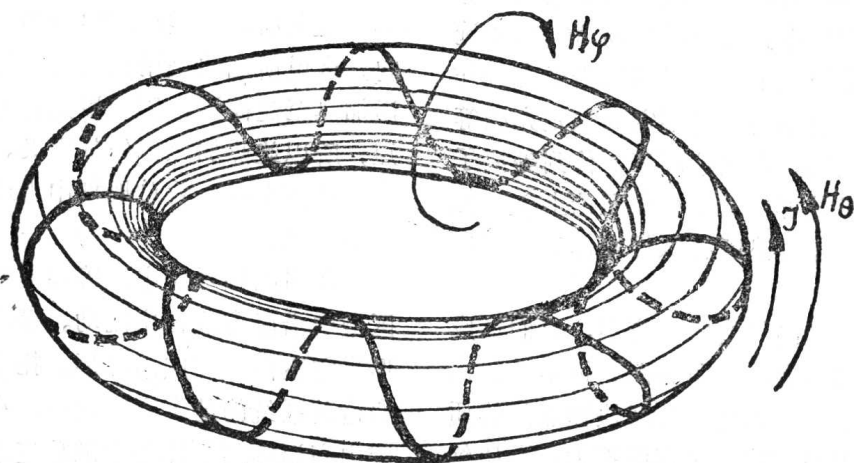


图2 托卡马克装置中约束等离子体的磁场结构（为了醒目，螺线的螺距已大大缩小）。

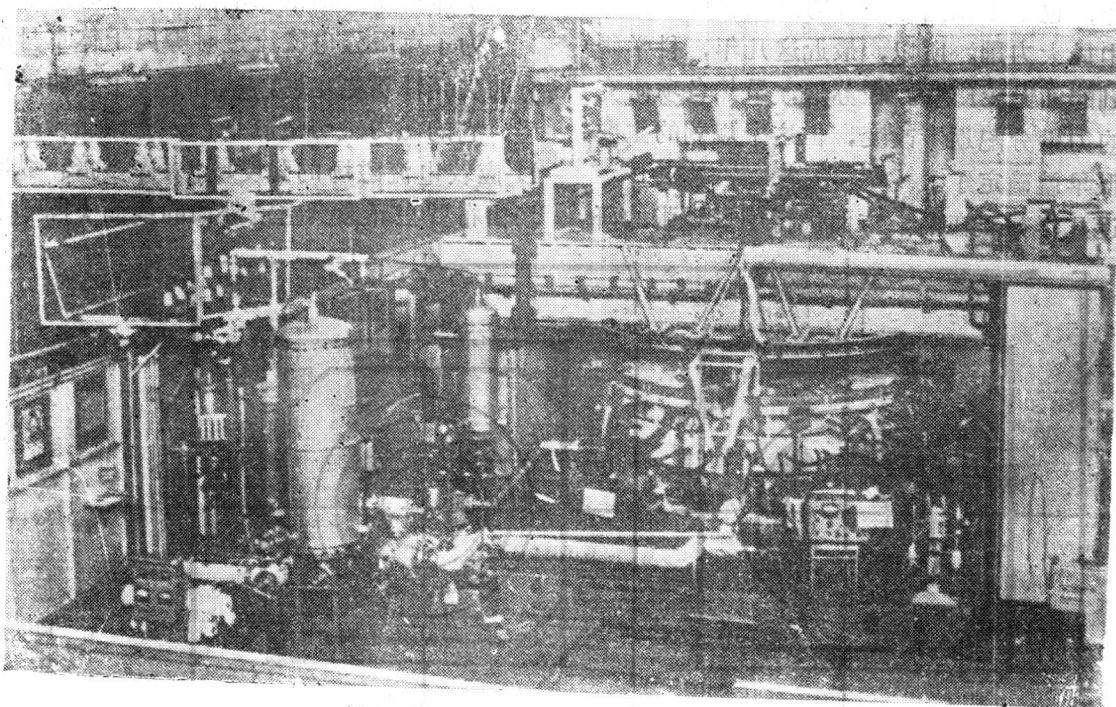


图3 托卡马克装置T—4的全貌。

子体的物理性质。用微波探测法测量了等离子体密度，在托卡马克装置上的实验，等离子体密度接近于 $2 \times 10^{12} - 6 \times 10^{13}$ 。电子温度 T_e 的最准确的数据是在测量等离子体的激光散射时获得的。1969年英国和苏联的物理学家共同工作时，在T-3装置上首次进行了这样的测量。离子温度 T_i 可以通过分析电荷交换过程中等离子体发射的氢（或氘）的中性原子的能谱来确定。测定氘等离子体中离子温度 T_i 的另一种方法是记录托卡马克装置中热核反应产生的中子辐射。

库尔恰托夫原子能所在托卡马克装置上研究等离子体的性质已经十余年。该所的理论研究和实验研究是同时进行的。因为在最初研究阶段B.Д.沙夫拉诺夫（В.Д.Шафранов）提出了等离子体环的平衡理论并建立了等离子体磁流体动力学稳定性的基本定则（所谓克鲁斯卡—沙夫拉诺夫〔Крускала—Шафранов〕判据），所以选择具体的实验计划就比较容易了。根据此定则，要保持等离子体环的稳定性，必须满足以下条件：

$$\frac{H}{H\varphi(a)} \cdot \frac{a}{R} > q,$$

式中 $H\varphi(a)$ —等离子体边缘的电场强度，

a —等离子体环的截面半径，

R —环形系统的大半径。

q 值叫做安全系数，它与等离子体环截面上的电流分布有关，在钟形分布时， q 值在2—3的范围内。

有关环形等离子体系统中扩散和热传导现象的非经典理论的提出，近几年来给实验研究的发展以有力的推动，由萨格捷耶夫（Сагдеев）和加烈耶夫（Галеев）奠基的这一理论，考虑到了环状螺线形磁场内带电粒子运动的一种重要特性，由于这一特性，等离子体环和直线等离子柱两者在性质上有很大的差异。在环状螺线形位形中存在所谓“关闭”粒子，它从磁场较强的区域反射回来沿着力线摆动。“关闭”粒子运动时，会明显偏离力线，所以它存

在时，就会使扩散系数和导热性急剧增加。

托卡马克装置内温度高而密度低的等离子体的扩散损失和热损失与初始的经典理论方案所定数值比较，应近似地按 $H^2/H\varphi^2$ 的比值而增长。对托卡马克装置而言，这意味着扩散损失和热损失率提高了几百倍。新理论的出现，有可能大大减少早先在实验数据和理论计算之间存在的偏差。但是，如我们后面将看到的，这并不意味着，引起托卡马克装置内等离子体能量损失过程的机制已经充分搞清楚了。

托卡马克计划多年来的实验工作，对装置作了一系列改进。由于改善了产生和加热等离子体环的真空条件，使有可能大大降低等离子体中的杂质含量。因为校正了磁场位形，并提出了控制等离子体环在真空室内位置的方法，就可以大大减小等离子体与内真空室壁和孔阑的相互作用，从而提高了等离子体的温度和稳定性。对过程最佳条件的探索也促使等离子体主要物理参数得到提高。

下面我们将介绍托卡马克计划实验研究所获得的最重要成果。用各种互不相关的方法在T-3装置上对等离子体热能的测定表明，在建立起热状态之后，当过程的初始条件变化范围相当宽时，等离子体的气体动力压强的平均值 $p = nk(T_e + T_i)$ 与等离子体环边缘上电流磁场压强（等于 $H^2(a)/8\pi$ ）之比变动甚小。当密度不太小时，比值 $\beta = 8\pi\bar{p}/H\varphi^2(a)$ 为 0.4 ± 0.1 。这个结果也可写成下式①：

$$2Nk(\bar{T}_e + \bar{T}_i) \approx 4 \times 10^{-3} I^2 a$$

式中 N —每厘米长的等离子体环所包含的总电子数；

$\bar{T}_e$ 和 $\bar{T}_i$ — T_e 和 T_i 的平均值（按等离子体的每个电子或离子计算）。

此处，电流强度以安培表示。电子温度一般大大高于离子温度。当 $n_e \approx 2 \times 10^{13}$ ，T-3装置中离子体环轴上 T_e 最大值达 $\sim 2 \times 10^7$ 度②。

等离子体环截面的温度分布曲线可由下式良好近似：

① k —玻耳兹曼常数，等于 1.37×10^{-16} 。

②温度常用电子伏表示，一个电子伏相当于11600度。在以后的叙述中，我们将采用这两种温标。

$$T_e = T_e(0) \left(1 - \frac{r^4}{a^4}\right)^2$$

这个分布的明显特点是有一个平顶, 证明在接近等离子体环的轴线处(此处 $H_\varphi \rightarrow 0$) 导热系数达到很大的数值。

对 T_e 的测量结果的处理表明, 等离子体环轴线上的 T 值可用下列过程参数的函数来表示:

$$T_e \approx 6 \times 10^{-3} \sqrt[3]{IH_1 R^2 \bar{n}_e} \frac{1}{\sqrt{A}}$$

式中 $\bar{n}_e$ —电子密度的平均值,

A —物质的原子量。

上述关系式与等离子体中热过程的非经典理论的预言相当一致。但是, 既然此关系式是通过处理有限范围的基本参数的实验数据而获得的, 所以, 说非经典理论定量结论在此已被实验所证实, 则为时尚早。T—3 装置实验中测得的 T_e 最大值, 氢为 $\sim 7 \times 10^6$ 而氖为 5×10^6 (在此情况下可观察到明显的中子辐射, 是准稳态的, 持续 20—30 毫秒)。决定等离子体环热损失过程的机制尚未最后确定。看来, 等离子体电子成分的能量损失较非经典理论所示的要快得多。T—3 装置的等离子体中热能保持时间 τ_E 为 3—10 毫秒。当改变实验的初始条件时, τ_E 与趋肤效应时间成正比变化。有 $\tau \approx 1.1a^2 \bar{\sigma}_E$ 的关系式, 式中 $\bar{\sigma}_E$ —等离子体截面平均电导率。

在通常实验条件下, 托卡马克装置中等离子体的电阻值要比理论预计的稳态条件下氢等离子体的电阻值大好几倍。产生这种异常现象的原因尚不清楚。等离子体中重元素杂质离子的存在可能导致电阻的增大。此外, 应当预计, 当等离子体密度不高时, 电流通过应伴有等离子体振荡, 从而导致电子的韧致辐射的加强。

关于托卡马克计划进一步研究的前景, 只能以实验中获得的规律性为依据作不很远的外推。如果继续用焦耳热加热等离子体, 那么看来只有进一步扩大装置的几何尺寸和纵向磁场强度, 才能使离子温度达到 $(2-3) \times 10^7$ ($2-3$ 千电子伏) 的范围, 使等离子体密度达到 $\sim 10^{14}$, 并使热能保持时间达到几十分之一秒。但是, 要达到 T_e 等于 10^8 的水平, 则需要

新的更有效的加热等离子体的方法。为此目的, 原则上可以利用快中性原子的强流注入等离子体和等离子体频率上电磁波的共振吸收的方法。

还应当指出, 采用能量“磁泵”方法的可能性, 方法是, 使等离子体周期性地压缩和膨胀。这可以通过平行于环形系统主轴的交变控制场 H_1 对等离子体环的作用来达到。用短脉冲大涡流电压对等离子体进行所谓湍流加热的可能性也引起了兴趣。目前上述任何一种方法尚未在托卡马克装置上进行过试验。

在仿星器上实行的是另一种封闭系统的方案。在这一类装置上等离子体环的磁绝热依赖于外加纵向磁场。为了能起到这种作用, 这个磁场应具有相当复杂的结构。这种结构的一个显明特点是有一个所谓“转动变换”, 磁场力线围绕等离子体环的环形轴(如果沿着真空室)而转动。托卡马克装置的磁场也具有这种性质, 不过它的磁力线的螺线结构是由等离子电流和外部线圈所产生磁场叠加而成。

对仿星器来说, 等离子体内不一定要有环电流。所以在这种系统中等离子体的产生不仅可借助无极感应放电, 而且还可利用高频电场使气体电离或从外部注入等离子体流等方法。

苏联, 对在仿星器上产生高温等离子体方法的研究是在哈尔科夫技术物理所和列别捷夫物理所进行的。已经建成仿星器多座。建于哈尔科夫的“飓风”(Ураган)是其中最大的一个。装置的等离子体环的长度为 10 米, 最大磁场强度为 10 千高斯。实验表明, 只有当磁场的几何形态满足极严格的要求, 而磁场强度很大的情况下, 才能在仿星器中获得物理参数高的等离子体。现在我们暂时还没有能完全满足这些要求的装置。所以, 近几年来所获得的大部分实验资料都是在等离子体密度低, 温度不高的条件下获得的。同时已经搞清等离子体的衰减速率随磁场力线转动变换角的增大而减小, 即随螺线结构陡度的增大而减小。

等离子体中能量保持时间随电子温度增高而延长。在“飓风”装置上, 当 $n_e \approx 2 \times 10^{13}$ 时, 保持时间可达 0.5 毫秒。据激光散射测得的 T_e 值为 100—400 电子伏。应当指出, 如对

仿星器“飓风”所获得的关于扩散速度和热损失的数据进行外推法计算，并将其换算成巨大的托卡马克装置的磁场尺寸和强度，则所得之能量保持时间和粒子寿命的数值均与T-3装置的数据相近。仿星器计划在目前研究阶段是有前途的。

对开端磁镜系统中灼热等离子体性质的研究成了苏联受控聚变研究工作总规划的传统部分。一般称之为磁镜捕集器。在这一类型的系统中等离子体快带电粒子因受等离子体区边缘处增强磁场的反射而被约束。最简单的磁镜捕集器如图4所示。它里面的磁场由两个电流方向相同的线圈产生。等离子体的电子和离子在磁力线密集的增强磁场区间沿磁力线振荡。但是，根据理论分析可以得出结论，等离子体会很快从这种捕集器中逃出去。这是因为磁场强度从等离子体所在之中间区域到两端，沿磁力线而增长，但同时径向磁场强度却在减弱。

等离子体是反磁体，因此它总是沿磁场减弱的方向运动，即向外疏散开。实验证实了这个理论预言。所以，简单的磁捕集器已为复杂

的所取代，这种复杂捕集器的磁场满足了所谓极小H原理，即由等离子体区沿各方向增强。

第一个满足这一条件的磁镜捕集器已于1961年在库尔恰托夫原子能所建成（图5）。作为磁场来源，不仅有线圈，还有六个直线载流导体。其相邻导体内的电流方向相反。这个系统产生一个磁场，它的磁场强度，从中心区向各方向增强。对这种混合场捕集器内等离子体行为的最初观测发现其最危险的不稳定性的所有标志（所谓槽型，或反磁不稳定性）全部消失，而这种不稳定性早先曾经是磁镜系统的缺点之一。这样，就成功地把等离子体中粒子和能量的保持时间增加两个数量级以上。以后，原子能所又建造了几个相似的装置（ПР-5，Орпа-1，ПР-6，ПР-7）。1968年已经在ПР-5装置上获得离子温度约 4×10^7 度（4千电子伏），密度 10^9 — 10^{10} 和能量保持时间~50毫秒的等离子体。

对更高密度方面进行研究时，理论预言是令人相当忧虑的。由理论得知，实验工作者在消除宏观不稳定性之后，进一步提高等离子体

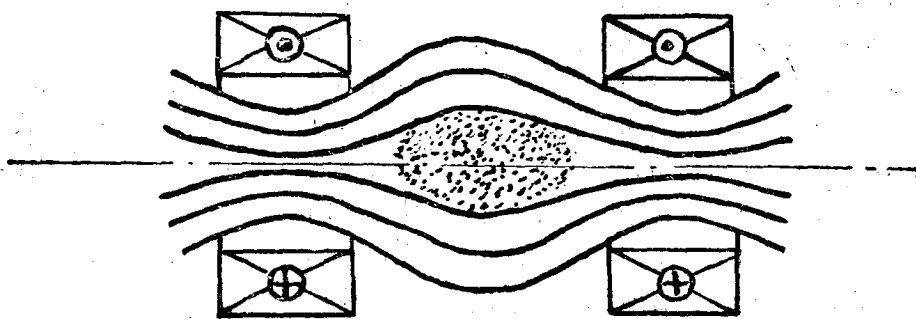


图4 最简单的磁捕集器示意图。

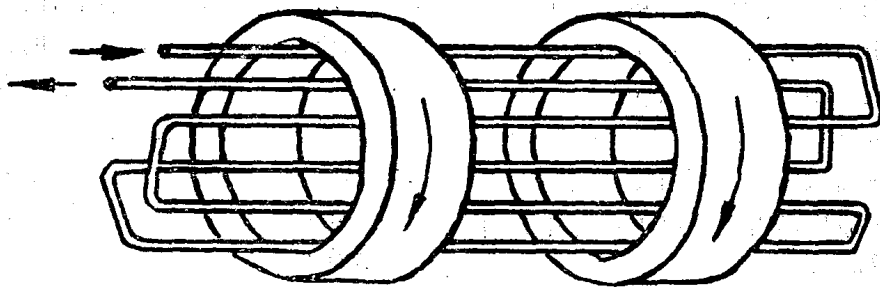


图5 绕组的形状，该绕组所产生的磁场向等离子体外各方向增强。

密度时,将遇到较微细的所谓“锥体”不稳定性。在磁镜捕集器内产生此种不稳定性,是由于离子在速度空间分布不平衡所致(这种统计性不平衡性是这类捕集器结构原理本身带来的)。据理论计算,若等离子体区域的纵向尺寸超过离子拉摩半径 ~ 100 倍,或等离子体的横向尺寸远小于所指定的值,则由于锥体不稳定性的振荡,等离子体会很快跑出捕集器。

但是,实验未证实这些忧虑。1968—1969年在PP-6装置上获得密度为 10^{11} 、离子温度为 1×10^7 度(1仟电子伏)和约束时间为15—20毫秒的等离子体,并且这一时间决定于原子快离子的电荷交换过程,而和任何不稳定性无关。在上述实验中,密度阈值超过一个数量级,在这种情况下,从理论上讲,会出现某一种锥体不稳定性。此后仍在这个装置上,对初始密度为 2×10^{12} ,离子温度为 $(1-2) \times 10^8$ 度(100—150电子伏)的等离子体的约束进行了研究。对这种温度较低的等离子体的研究之所以感兴趣,是因它最充分地模拟了具有热核参数的等离子体状态。由于温度相对地不高,在这情况下,粒子间的库伦碰撞在等离子过程中起决定性作用,也就是决定捕集器中等离子体寿命的主要过程没有不稳定性。

对这种等离子体衰减速率的测量表明,在持续时间为0.2—0.3毫秒的初始衰减阶段,无明显的不稳定性标志。在这一初始阶段等离子体从捕集器逸出速率的测量结果与等离子体稳定性经典理论的计算结果相符合(在计算中仅考虑粒子因库伦碰撞而通过磁镜的漏泄)。

1967—1968年在奥格拉—I(Огра—I)装置上,首次进行了消除各种不稳定性的实验,其方法是通过反馈系统作用于等离子体的电场来进行。在密度不太高的等离子体的实验中,这一方法很有效。后来,这个方法被苏英两国物理学家成功地运用于在卡拉姆实验室“凤凰”(Феникс)装置上的共同工作中。进一步的实验应当搞清,能否用反馈系统克服简单的磁镜捕集器内高密度等离子体存在的槽型不稳定性问题。

磁镜捕集器实验研究计划的主要任务之一是研究在磁镜捕集器中注入离子温度高、密度

大的等离子体的方法。很自然的一个方案就是将强流快中性原子注入捕集器,然后用某种方法进行电离。鉴于在奥格拉—I和奥格拉—II装置上所作的研究,曾研究并建造了几台快速原子注入器。其中最后一台,在能量为20仟电子伏时,其当量电流强度达0.5安,是供给正在建造中的几何尺寸不大的ЛИН—5装置用的(等离子体区的尺寸 ~ 5 立升)。

对奥格拉—II装置作某些修改后,进行一些实验,其目的是搞清是否能用所谓“湍流加热”来获得高温密等离子体。这可以用下述方式来实现:用一台专门的注入器,沿系统的轴产生一股粗大的冷等离子体流。然后在捕集器一端的注入器和另一端的电极之间,加上其脉冲时间约几微秒的高压脉冲。此时在等离子体流内便产生一个约20仟安的纵向脉冲电流。当大密度的电流通过稀薄的等离子体时,由于不稳定性的发展,于是对电子和离子产生强烈的湍流加热作用。当加热期终结后,对等离子体参数的直接测量表明,当密度为 $\sim 1 \times 10^{18}$ 时,离子的能量分布范围很广,而其平均能量为 $\sim 1 \times 10^3$ 电子伏。

在AC装置上研究了离子-回旋不稳定性,这种不稳定性产生于密度很低的等离子体中。分析这种不稳定性对于评价回收由等离子体通过磁镜而逃逸的粒子能量的各种方案,是有重要意义的。没有例外,在这些装置中,类似的不稳定性会发展起来,因而能量回收效率将急剧降低。

多年来,非常注意分析等离子体与高频电磁场相互作用的过程。对这些过程之所以感兴趣可以从下述两点来看:第一,高频场能作为克服各种不稳定性的手段,而这种不稳定性是受磁场约束的等离子体所固有的。在此情况下,它还能在实现磁绝热时起重要的辅助作用。第二,用高频场加热等离子体,特别是加热托卡马克型封闭系统或磁镜捕集器中的离子成分,将有很大意义。这里可分为两个基本方案:

(a)用外加高频电压共振加热;

(б)用等离子体有序运动衰减时产生的高频振荡场进行随机加热(湍流加热)。

用高频场稳定等离子体的实验(所谓动力

学稳定)已在苏霍姆斯基技术物理所、库尔恰托夫原子能所和列宁格勒电物理仪器研究所进行数年。在这些实验中稳定的对象选择为纵向强电流等离子体柱。等离子体柱本身是磁流体动力学不稳定的。一系列实验表明,如果在等离子体柱内附加产生一个纵向高频电流,则基本的不稳定性就能克服。

用四根平行于等离子体柱的直线导体系统所产生的高频场也能有效地防止它的畸变。尽管这些结果似乎是令人鼓舞的,动力学稳定的方法的进一步发展,目前还不能使人很乐观。要向致密的高温等离子体过渡,只有极大地提高高频场的功率才能达到稳定。

在最近时期内,这实际上是不可能达到的。看来,用高频场加热等离子体,成功的可能性很大。哈尔科夫技术物理研究所研究了用拉摩频率(离子回旋共振)的高频场对等离子体离子成分的共振加热。在这些工作中解决了离子-回旋波在环形等离子体内的产生和传播问题。

原子能所和列宁格勒技术物理所正在研究几种不同的用高频场共振加热等离子体的方法:电子回旋共振和所谓“混合共振”。此外,原子能所还在研究用磁声共振对环形系统的等离子体加热的问题。在磁声共振中,高频辐射波长约等于环状等离子体环的横向尺寸。

苏联科学院物理所对电子的非共振加热方法进行了理论和实验方面的研究,这种加热过程产生于波的场强超过某一阈值之时。物理问题研究所在进行用分米波无线电辐射加热等离子体的有趣实验。

近几年来,利用流过等离子体的电流对等离子体本身进行湍流加热,起了重大作用。这个效应是1961年原子能所在用大振幅磁声波加热等离子体的实验中首次发现的。如前所述,这个效应不久以前已被成功地运用于加热奥格拉-Ⅱ磁捕集器内的离子成分。哈尔科夫技术物理所用这种方法把密度为 $\sim 10^{15}$ 的等离子体离子成分成功地加热到2仟电子伏的温度。可能,在托卡马克装置中存在异常电阻的情况下,也能出现湍流加热效应,但此时,被加热的是电子成分。

应简要地提一下通过“等离子体聚焦”获得密度大的高温等离子体的方法。这里我们遇到一种使用磁绝热的极限情况,在这时快速粒子留在等离子体高温区的时间甚短,而在此区内密度则很大。

当两个同轴圆筒间的氙内放电时,发生等离子体层运动,图6示出等离子体层运动的连续相。等离子体快压缩时,其内部发生的冲击波在轴的附近聚积。此时形成等离子体聚焦,其直径约为十分之几毫米,存在时间为十分之一微秒。当等离子体密度 $\sim 10^{19}$ 时,其内部温度为1—2仟电子伏。聚焦区等离子体压力在 10^4 — 10^5 大气压的范围内。在等离子体聚焦中发生强烈的核反应,而且氙内中子辐射强度可达 10^{18} 中子/秒。中子产额大体与放电中输入能量的平方成正比。

产生中子辐射的机制暂时还不清楚。但可以预料,等离子体灼热区的热核反应对这种辐射有很大的贡献。在评价这个产生高温等离子体方法的今后前景时,须要注意它的主要缺

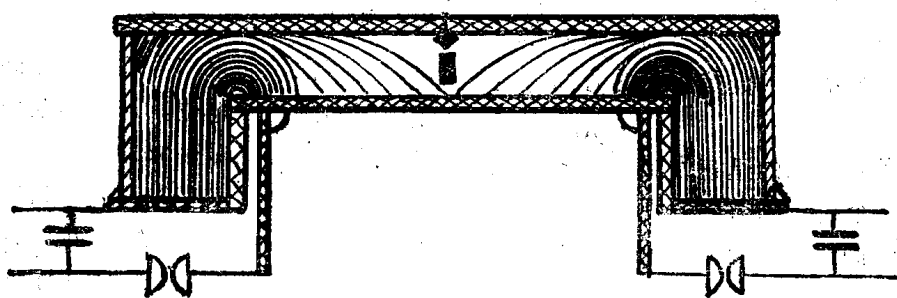


图6 产生“等离子体聚焦”装置的示意图。