

内部参考

等离子体物理 与受控热核反应

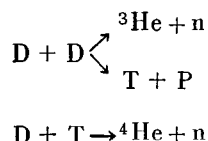
(译文集一)

中国科学院图书馆

一九七三年一月

通向受控核聚变的道路

受控聚变的问题，在于从技术上利用轻核〔特别是氢的同位素氘（D）和氚（T）〕内部的能量。这种能量在聚变反应：



中释放出来，这里的n和P分别表示中子和质子。

在这样的反应中，单位质量核燃料所释放的能，比铀（目前主要的核燃料）裂变所释放的能量大数倍。如果考虑到应用所产生的T和 ${}^3\text{He}$ 的可能，则燃烧1克氘大约可得到100,000千瓦小时的能量。

有下面两个理由非常需要利用聚变反应作为能源：第一，最基本的核燃料（氘）是无穷尽的，可以直接从水中提取，大约每7,000个氢原子中就有一个氘原子。第二，核聚变不象核裂变那样产生放射性残物，因此贮存——严重妨碍通常的核设施——不是严重问题。但是同裂变相反，核聚变反应在物质处于正常态的情况下是不能自持的。为了促使核聚变反应，必需将氘（或氘与氚的混合物）加热到几亿度的高温。只有在这样的条件下，原子核在碰撞过程中才会有足够大的速度，以克服核之间的静电排斥，引起热核反应。在发生这样过程的温度范围，物质处于完全电离状态，即由高速无规运动的原子核和电子所组成的高温等离子体。高温氘（或氘—氚）等离子体是新的核燃料。用以点燃未来的可以发电的核聚变装置。

温度和约束

为了促使这种新的核燃料发挥作用，需要满足两个条件。第一，离子温度必须超过一定的最小值，使得聚变反应中所释放的能量超过等离子体由于X射线辐射（由于离子—电子碰撞）所损失的能量。这个温度阈值对于氘等离子体大约在2亿度，而对于纯氘—氚混合物，在同样的密度下，大约在5千万度。但是当有极微量的重原子作为杂质存在时，则这个阈值会显著地升高。

第二，热能不会长久停留在等离子体中。必要的条件是 $n\tau > A$ ，这里的n是等离子体的密度（每厘米³中的电子数目）， τ 是热能的平均约束时间（等离子体能量密度与热流量之比），而A是随核燃料成份而变的常数。

这个条件的意义是很清楚的。只有当等离子体中的每一个原子核、在时间 τ 内由于碰撞而引起核反应的几率足够高时，才能在核燃料点火之后释放出其包含的能量。这个几率正比于 τ 和等离子体的密度，并且其乘积必须超过一定的界限。对于纯氘来讲，这个最小值 $n \cdot \tau \sim 10^{16}$ ，而对于氘—氚混合物则为 10^{14} ，大大的降低了。我不打算给出A这个常数的精确数值，因为它同热核装置的设计有关。

可以看出，氘氚的混合物比纯氘是一种更为有效得多的热核燃料。氘在自然界中几乎是不存在的，只有在通常的铀核反应堆的帮助下能获得少量的氘。因此只有在热核反应器中产生大量氘的方法得到发展，才可能用氘作热核燃料。原则上这种过程是可能的，比如应用中子倍加反应（即 $n \rightarrow 2n$ 类型反应）。上述过程，这里不拟作讨论，但已可看到氘终于要单独承担这种新的核燃料的任务（如果从长远的观点来看待热核能）。

从苏联、美国、英国在实验室中开始研究这个新的核燃料——氘等离子体算起已有二十多年了。此后其他国家的很多科学组织开始研究受控热核聚变。此方面的研究很快地扩大了，并且具有基础科学研究的特点。但是，这个在开始时具有乐观前景的问题，现在看来是这样的困难，以致在此方面的研究工作仍然处于基本物理现象的研究水平上，并且距离要达到的实际目标还很远。目前主要的困难是在实验室中产生具有上面所要求那些参数的等离子体的方法。一直尚未在某种装置上获得上述两个指标的同时实现。尽管如此，但正逐步向最终目标接近，并在这个进程中进行着各种不同思想的探索。

磁 约 束

到目前为止，产生高温等离子体的大多数方法的基础是磁约束（或磁的热绝缘）；等离子体可被很强的磁场所捕获。这样来选择磁场的几何形状，致使等离子体中的电子和离子只能沿磁力线方向比较自由地运动，而不从束缚等离子体的空间逃出。在这样的环境中，快电子和快离子将能量传递给容器壁的可能性缩减到最小值，于是热量被束缚在等离子体中。磁约束高温等离子体的原理在二十多年前互相独立地为苏联、美国和英国的物理学工作者所提出。这成为受控热核聚变的出发点，并且形成了在这一领域中几种基本路线的指导思想，现在可以说是传统的方法。

近年来，由于产生某些新的思想，基础研究路线方面在增加，发展特别快的如激光加热物质、高功率电子束加热物质等。在这样的装置中磁的热绝缘是不必要的。现在尚不可能在受控聚变的各方法中作最后的选择，即指出某个可以沿着走的乐观方向，集中主要力量的措施都为时尚早。在这个领域中尚没有一条至高无上的道路。因此让“百花齐放”——至少在未来的数年内，科学研究计划要保持在足够广阔的基础上。在考察当前总规划的各个方面的状况，我首先要谈一下，从磁约束等离子体各种思想的特殊装置中所得到的结果。

在这些装置中占有重要地位的是所谓闭合磁约束系统，在这种系统中等离子体可以沿着磁力线自由流动，在空间上没有一个尽头的区域。等离子体在一环型管中形成，并具有一环圈状态。在这种类型的磁约束装置

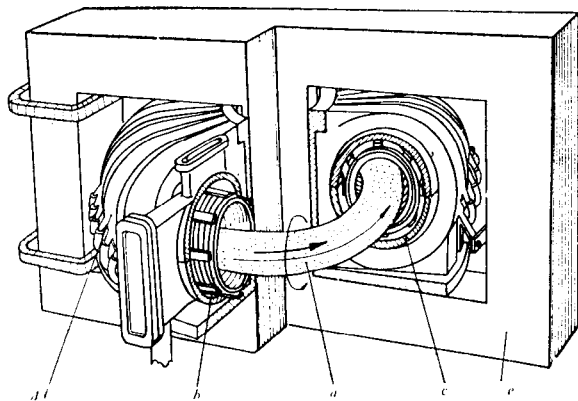


图1. 托卡马克装置的示意图（截面剖开）。a, 等离子体柱；b, 内真空室（薄不锈钢）；c, 厚铜壳；d, 产生外部纵向磁场的线圈；e, 变压器铁芯。箭头表示等离子体电流和磁场分量。

中，等离子体粒子受最小的扰动。大多数的电子和离子只在磁场垂直的方向上受到限制，而沿着磁力线可以完全自由地运动。这些称之为“飞越粒子”。但在任何闭合系统中，也存在一些所谓“约束”粒子，这些粒子被强迫在磁场的有限区域中振荡。这些粒子沿磁力线运动时，遇到较强的磁场则反射回去。这些粒子在高温等离子体的能量平衡中起很大的作用，它们的存在增加了等离子体柱的热传导和扩散速度。

闭合系统的两个典型例子是托卡马克和仿星器。从产生准稳态高温等离子体装置的几何观点来看，托卡马克是其中最简单的系统。在这种类型的装置中，沿着环状的等离子体产生感应电流，并在环状容器中间竖起一变压器的铁芯。电流的磁场在等离子体的热绝缘和约束方面起主导作用。等离子体中通过大电流而引起焦耳加热。为了防止破坏性很大的不稳定性（这是通过强电流的等离子体的特征）的发展，加一纵向磁场。这个磁场是由一外线圈产生，并与电流平行。这个磁场的强度 H_0 比电流产生的磁场 H_ϕ 要大很多倍。产生纵向磁场的线圈分布在环形容器的外表面上（见图1（略）），此图是托卡马克装置的示意图。等离子体柱中的磁场，是由这两种磁场组合而成，因此它的磁力线具有螺旋线状。当 H_0 大于 H_ϕ 时，则螺旋线主要是沿着等离子体柱表面。托卡马克的特点在于其磁场的轴对称性，这样就使产生具有较大横断面的等离子体柱简单化了。

托卡馬克的研究

在托卡马克装置中进行等离子体性质的研究，开始于莫斯科原子能研究所，现在已有15年以上的历史了。在1969年夏天，英国卡哈姆实验室的物理学家们积极参与这项工作，首先使用激光在苏联最大的托卡马克装置上测量等离子体的电子温度。从1970年开始，在美国、法国和德国先后都有一些研究人员研究托卡马克类型的装置。在研究托卡马克中的物理现象方面，理论和实验是紧密结合的。由于沙弗朗诺夫在他早期的研究工作中发展了等离子体柱平衡的理论，并给出对抗具有破坏性的大尺度形变，确保稳定的基本规律（即所谓 Kruskal-Shafranov 判据），因此使选择特定的实验条件变得简单了。根据这个规律，当满足

$$\frac{H_0}{H_\phi(a)} \cdot \frac{a}{R} > q$$
时，则等离子体柱是稳定的，此外的 H_0 是由电流产生的在等离子体表面上的磁场强度， a 是柱的小半径， R 是环的大半径。 q 称之为稳定的界线：此值依赖于电流在等离子体横断面上的分布，如果这个分布是钟形的，则 q 值超过2或3。

最近，由于环形系统中热导和扩散的“新经典理论”的发展，强烈刺激了进一步的实验工作。理论基础是由沙格杰夫和加勒叶夫奠定的；他们首先指出，俘获粒子（它们的运动对给定的磁力线具有很大的偏离）的存在导致等离子体热导率的迅速增长。这个新理论解释了以前在理论和实验中所存在着的分歧。

目前托卡马克中最大的装置是T4。其环形室的大直径（ $2R$ ）为1.8米，等离子体柱的横截面直径为35cm。室的外壁是由厚的铜壳作的。纵向磁场（在柱轴心上测量）为4万高斯，而电流为230千安。等离子体的寿命（电流维持在等离子体中的时间），在T4中为0.1秒。平均的电子密度 $\bar{n}_e$ 为2到 $3 \times 10^{12} \sim 3$ 到 $4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。

实 验 结 果

用不同方法分别得出,当等离子体已经热化了,则等离子体热压力平均值 $\bar{P}$ 对电流在等离子体柱表面产生的磁压力 $\frac{H_\phi^2}{8\pi}$ 之比值(β_ϕ)、对过程的初始条件的变化在相当大的范围内是极为敏感的。除去在低密度下(此时 β_ϕ 值为 $\sim 0.45 \pm 0.1$)外,这个值可以写成:

$$N(\bar{T}_e + \bar{T}_i) \simeq 1.6 \times 10^{13} J_A^2$$

这里的 N 是等离子体柱每单位长度(cm)上的电子总数($N = \pi a^2 \bar{n}_e$), $\bar{T}_e$ 和 $\bar{T}_i$ 分别为电子和离子的温度,而 J_A 是电流(以 A 为单位),电子温度一般要超过离子温度,并在等离子体轴心上达到其最大值,对于 T_4 来讲为 $\sim 3 \times 10^7 K$ (密度 $\bar{n}_e \simeq 3.5 \times 10^{13}$)。

实验上所测得的离子温度同新经典理论对等离子体热过程分析所预言的相符合。对 T_4 来讲,在轴心上的最大离子温度为750万度(氘等离子体)。在此情况下已有中子发射,在毫秒量级内是准稳态的。看来中子是热核中子,至少当等离子体密度在较高的情况下是如此。

等离子体柱的热损失机构尚未作出最后判断。从能量平衡测量的结果看来,电子的能量损失,比新经典理论所预言的要快。在等离子体中最好能量约束时间 τ_E 对 T_4 来讲不大于10到15毫秒,但是 $n\tau_E$ 决定等离子体中有效的热绝缘时间,现在达到 $3 \sim 0.5 \times 10^{12}$ 。在托卡马克上目前所达到的基本物理参数(T_i 和 $n_e \tau_E$)都还比同未来热核反应器所要求达到的值为小。在过去的十年中托卡马克装置中的离子温度和能量约束时间都是稳定上升的。在第三次日内瓦和平利用原子能国际会议以来的七年中, T_i 和 $n\tau_E$ 提高了一个数量级。人们希望在未来的5年中,在更加强大的托卡马克装置上这两个参数至少再增长5倍。从目前对托卡马克中等离子体的行为来看,这是可以达到的,只要在更高的温度下,等离子体的行为仍然保持目前的状态,粒子之间碰撞很少。如果在加热等离子体方面发展一些新的方法,则其前景仍然是乐观的。因为焦耳加热随着温度的提高越来越不起作用。作为改进等离子体物理参数的方法,可以考虑沿着系统主轴改变等离子体柱的横截面。这样,人们可以考虑在不改变 H_θ 的情况下显著增加电流磁场强度 H_ϕ ,于是也增加了等离子体压力。原则上可以认为这是托卡马克装置的一个潜在力量,实现这一点将意味着一个巨大的进步。

仿 星 器

仿星器是另外一类闭合系统,约束等离子体柱的磁场是外加的纵向磁场,它的结构特殊并比较复杂,即所谓的“旋转变换”的形式。换句话说,磁力线沿着环形的主轴旋转。(同托卡马克的磁场相仿,但此处的磁力线是由 H_θ 和 H_ϕ 迭加而成的螺旋线)。

在仿星器中,等离子体中环电流的存在是不重要的,因此在这种系统中不仅可以由感应击穿产生等离子体,而且可用高频电场电离气体产生等离子体,或者由外面向容器中注入等离子体。

仿星器的计划是在美国普林斯登实验室开始的。此后在英国、德国和苏联相继发展起来。仿星器的工作在过去受到某些挫折,但有迹象表明,在不久将来,仿星器在产生具有高指标参数的 T_i 和 $n\tau_E$ 的等离子体方面也会起作用。为了尽可能增加等离子体柱的横截面和增大磁

場的垂直分量，借以获得良好的热绝缘，有必要改变这一类装置原来的几何比例。

磁 鏡

另外一种传统的研究热核等离子体的方法是所谓的绝热磁捕集器。这种系统中，快速运动的等离子体带电粒子由于“磁镜”反射而被约束。磁镜就是由于磁场强度增加而使磁力线密集的区域。产生这种磁场位形的最简单的方法就是在同一轴线上放置两个载有同方向电流的线圈。在每一个线圈处的磁场强度比两线圈之间的强度为大。因此在线圈处的磁力线就密集起来。在这里，就对带电粒子形成所谓磁镜：电子和离子陷在这样的磁场之中由于磁镜的反射而沿着磁力线来回振荡。“俘”的条件是粒子的速度矢量同磁力线之间的夹角必须足够大。如果由于碰撞而使这个粒子偏离上述条件，即其夹角很小，则此粒子终究会沿着磁力线自由逃出磁镜而损失掉。这就是约束粒子在绝热陷阱和闭合系统中的原则区别。比如在托卡马克中由于碰撞一个约束粒子的速度方向发生偏转，而逃出自陷区，转变成“飞越”粒子，沿着磁力线自由运动，但仍然处于等离子体之中。绝热捕集的最大优点是两端开放，可以由各种不同方法产生等离子体，比如从外面注入。

热核研究在这个方面的发展具有从乐观的希望到烦恼的失望的戏剧性转折。在很长的一段关于实验结果的争论之后，在1961年初建立了在磁镜中约束高温等离子体稳定的必要条件。这个必要条件是沿着等离子体存在区域的所有方向上磁场强度必须是增长的（在闭合系统中也应如此，尽管有不同的形式）。现在在美国Livermore实验室，苏联原子能研究所以及法国Fonteney-aux-Roses科学中心都开展了这项工作。到目前为止，最好的等离子体参数是 $T_i \sim 6 \times 10^7$ 和 $n\tau_E \sim 7 \times 10^9$ 。这比第三次日内瓦会议（1964）时的参数来讲是前进了一大步。这表明，甚至在比较高的等离子体密度（ 10^{13}cm^{-3} ）的最佳条件下，它的损失比稳态的损失也要大很多倍。因此，只有发展某种新方法有效地克服粒子从磁镜逃出的损失，对于达到 $n\tau_E \sim 10^{14}$ 条件才是可能的，如果将这些粒子用一特殊的方法重新注入到等离子体中，在这样的一个闭合循环中循环效率为97%，甚至对于一个稳态装置也要大于90%。于是，按照这种方式工作的热核反应器，有用的能量仅仅是系统一个循环能量的很小一部份。各种回收能量的方法都在考虑之列，但将它们应用在这样的周期循环的设计中都为时尚早。

这种磁镜式的热核聚变工作在美国和苏联仍然是一个重要方面。很希望在下一个五年能弄清楚这种系统现实性的问题。

到这里我一直讨论的是稳态和准稳态的磁约束系统，它们的参数随时间变得比较慢。

“准稳”这是意味着作用在等离子体上的各种力处于平衡状态。即等离子体的压力在任意时刻都同磁压力相补偿。在过去对于用完全不是稳态的方法产生高温等离子体也给以足够注意。这里作用在通过可变磁场加速的等离子体上的惯性力起重要作用。在此方面高度发展起来的研究工作都是在所谓角向收缩上作的。在一很长的直线管中形成一高密度的等离子体柱，在管内产生一均匀的纵向磁场，在大约几个微秒到几十微秒时间内增长到几万甚至几十万高斯。这个脉冲磁场压缩一个事先产生的冷等离子体柱，并且加热它。在这样的快过程中所产生的等离子体，其密度大约为 10^{16}cm^{-3} ，而温度则为几千万度。能量的约束时间随着管长而加长。在角向收缩的研究工作方面，美国的洛斯阿拉莫斯实验室和英国的卡哈姆实验室作出了最主要的贡献。目前这种系统的最好参数是 $T_i \sim 6 \times 10^7$ 而 $n\tau_E \sim 2 \times 10^{11}$ 。在角向收缩中的主要损失是属于终端损失，因此在目前对于从开端向闭合的环形角向收缩过渡的可能性受到

极大的注意。为了产生一平衡的和宏观上是稳定的等离子体柱，外磁场结构变得相当复杂。如果在环形闭合角向收缩上的实践证明是有成效的话，那末就为产生比较长的约束时间的高密度等离子体的可能以及磁能的经济应用打开了前景。（等离子体压力对磁压力之比值比托卡马克装置要大得多。）宏观不稳定性本身对长的能量约束时间是不充分的，对闭合系统来讲，热能损失率主要决定于磁场的横向分量。推测在闭合角向收缩中这个分量具有相当大的值。看来等离子体柱的横断面的半径不要太小也是必要的，因为 τ_E 正比于这个半径的平方。这些条件在环形角向收缩上是否都存在，尚不清楚，虽然高密度也起一定的作用。在谈脉冲加热等离子体过程时，一定要说一下等离子体焦点的实验，这是一个高密度热等离子体球（ $n_e \sim 10^{18}$ 到 10^{19} 每厘米³粒子数， $T_i \sim 10^7$ K）在一个很小的体积中。这是由一在等离子体中流过的电流产生磁场对其压缩的结果，过程持续时间大约 $0.1 \mu s$ 。等离子体焦点最好地实现了在很短的时间内磁约束的思想。它也可以作为脉冲中子源使用。等离子体焦点的 $n\tau_E$ 值一直未很确定，在目前很难估价这种过程实际应用的前景。

激 光 加 热

最近向着产生热核条件的超快过程的方向展示出巨大的可能性。居于首位的是用激光脉冲加热高密度物质。其方法是将激光束聚焦在直径为 0.001 mm 大小的氘靶上。大多数的公开实验结果，光脉冲宽度为 10^{-8} s 以下，功率密度为 10^{13} 到 10^{14} W/cm^2 。在光照情况下，固体靶物质的温度上升很快。开始时形成具有很高温度超高密度的等离子体。光的能量在一薄层内就已阻尼（吸收）掉了。在这里已满足了共振条件，即入射光频率同等离子体振荡频率极为接近，它正比于 $\sqrt{n_e}$ 。热能很快从这一薄层传到靶的内部，加热区具有很高的温度。由于物质内部热传导很快，靶物质在飞散之前可以加到很高的温度。因此在这样的过程中磁的热绝缘是不必要的。在这样条件下产生的中子发射，首先被莫斯科科学院物理研究所在1968年观察到；所用的靶子为氘化锂。最近法国Limeil物理工作者们将中子产额提高到 $10^4/\text{pulse}$ 。目前在这种方法的发展中认为最乐观的路子是在均匀的汇聚激光场中加热氘球（或氘氚的混合物）。最近美国一些物理学家（E. Telle等）建议用均匀聚焦激光束产生超高密度物质的方法。由于迅速气化的靶物质而产生的反作用力压缩靶物质。计算表明，用适当的脉冲形状可以在脉冲尾部的暂短时间内大大的提高压缩力。在非常高的密度下，有效的核反应是可能的。激光加热过程的研究很快可能成为受控热核聚变研究的一个主要方面。在这方面进一步发展的前景取决于提高激光效率研究的本身，而现在是很低的。现在还很难指出，激光功率达到多么大才能获得热核反应正能量输出所需要的 T_i 及 $n\tau_E$ 的值。

原则上还可应用强相对论性电子束迅速将物质加热到热核温度。如果理论上所预言的在等离子体中电子束迅速减速被证明，以及同强电子束聚焦有关的一些困难得到克服（其电流在 10^6 A ），则此加热方法才具有实际应用的前景。

研 究 的 形 势

综合受控聚变研究的形势，首先应指出，多年来在传统的道路上有了稳步的进展。当然，同开始的乐观期望迅速进入热核时代相比，这个进展是很小的，但不管怎样，进展是有的。此外，为解决这个问题的一些新的方法出现了，而这些方法看来都是很乐观的。不管哪

个方法,对于希望在下一个十年内达到长期追求的 T_i 和 nt_E 指标是有基础的。达到这些指标之后,最重要的工作将是同设计核反应器有关的纯粹工程问题了。很多可能解决热核问题的那一个办法将首先到达目的地,还十分不清楚。谁若能描绘出未来的热核反应器,那他就是一个真正勇敢的人。首先他就已经处于现代和未来的热核世纪的中间地带了。

译自:《Nature》1972年,239卷,5366期,18—22页。

作者:Artsimovich, L.

强相对論性电子束在氘化聚乙烯靶上产生中子

利用Bennett¹⁾发展的新技术,即用一根绝缘棒在二极管中导引电子束,用于强相对论性电子束辐照 CD_2 靶。具使即将直径2毫米,长8厘米的玻璃棒嵌入阴极用以使电子束定向射到阳极上的 CD_2 靶。使用了一个范德格拉夫型X-射线闪光装置。电流脉冲的名义值为2.0兆伏,30千安,35毫微秒。观察到的中子脉冲高达 5×10^7 。发现当靶厚由3毫米到10毫米,观测到的脉冲相差不多,而靶厚小于1毫米时产额就大大降低。在实验误差为10%的范围内,没有发现有 $0^\circ/90^\circ$ 的各向异性。因此,中子发射的机制是热核起因的可能性比离子加速的可能性要大。

译自:《Bulletin of the American Physical Society》1972年,17卷,
5期,690—691页。

作者:Kerns J. R.

等离子体中的波和不稳定性的国际会议

澳大利亚的因斯布鲁克大学理论物理研究所宣布于1973年4月2日至6日在因斯布鲁克(Innsbruck)举行国际会议,讨论等离子体中(线性和非线性)的波和不稳定性问题。

译自:《ZAMP》1972年23卷,2期338页。

用激光产生核聚变：热核发电的新探讨

假如在太阳内发生的氢核聚变能在地球上被控制并利用，海水可以向全世界提供所需要的燃料足够一百多万年；但是，现在还没有证明可以用来控制核聚变的装置。美国在过去二十年间在聚变研究方面所投入的人力和资金，大部分是为了达到用磁约束聚变反应的目的，但是，有许多科学家现在认为，用大功率激光器取得聚变的目的可能首先达到。

在苏联研究人员于1968年第一次证明激光能引起聚变反应后，许多国家扩大了它们的激光研究项目。但是，在美国原子能委员会于去年十一月透露一直是保密的一种新激光方法的细节以前，大家曾认为一个实用发电厂所需要的激光器的尺寸可能是大得难以办到。取代单激光束加热氢同位素靶丸的老办法，而用来自不同方向的许多光束来加热靶丸，使它更被大大压缩。这种新方法的优点迄今不过在计算机模拟中得到证明；但是，如果预计的效果能在实验中产生，则苏联现正建造的和美国计划在今后一两年内建造的大型激光器会证明这个原理的可行性。

某些科学家们预言，用激光引起核聚变的可行性如在二至四年内得到证明，与用磁约束核聚变的缓慢进展比较起来，会是引人注意的。但是，用磁约束核聚变的研究比较先进得多，因为在实验结果与理论预计之间的对比有相当长的历史。试验激光引起核聚变所需要的大型激光器不过刚可利用，并且需要许多改进来完善供实用发电设备用的激光器，而发电设备本身的设计尚在雛型阶段。由于没有可想得到的方法能使聚变反应堆中的材料结合来产生核爆炸，将遇到的主要环境问题是氙的密封方法，因为它是一种极有挥发性的主要放射性副产物。第一代聚变发电设备几乎可以肯定是要用蒸汽涡轮来发电，因此热致污染的程度差不多和用矿物或裂变燃料的发电设备一样。

用激光产生核聚变过程的大致情况如下：一个很小而仔细聚焦的激光点很快地对一小块氘和氚的靶丸加热，在它显著地膨胀以前，达到足以激起聚变的温度（摄氏一亿度）。由于牛顿的惯性定律基本上规定膨胀速度（每秒约 10^6 公尺），激光聚变常被称为惯性约束的聚变。一毫米大的靶丸按每秒 10^6 公尺的速度膨胀，在一毫微秒内（ 10^{-9} 秒）会增大一倍，因此，激光能必须很迅速地供给。

旨在用激光产生核聚变的研究正沿着两个平行途径前进，迄今它们之间尚没有什么相互作用。在理论研究方面，是用计算机模拟激光与燃料靶丸相互作用时所发生的复杂物理效应。在实验研究方面，至少是在美国，是集中力量来发展能在不到一毫微秒时间内供给能量的强大激光器。由于钨玻璃激光器的聚焦和同步特性比其他类型的大功率激光器都优越，大都努力于钨装置的发展。

苏联的激光聚变研究计划规模最大，据估计约为美国计划的一倍，但最近美国已扩大它的计划。为激光聚变研究用的联邦预算申请额已在去年几乎翻了一番，从1972会计年度的一千三百万美元增加到1973会计年度的两千三百万美元，并且到1974会计年度还会再度增加。在劳伦斯利弗莫尔实验室（Lawrence Livermore Laboratory）和洛斯阿拉莫斯科学实验室（Los Alamos Scientific Laboratory）加强的研究计划已经上马。另外，某些私人方面正

支援在罗彻斯特大学 (University of Rochester) 进行的激光聚变研究, 在这里, 该大学、通用电气公司 (General Electric Company) 和埃索研究和工程公司 (Esso Research and Engineering Company) 共同资助在1972年需要一百万美元的一项研究计划。还有在密执安州安阿伯 (Ann Arbor) 的一个名叫KMS聚变的公司, 计划在今后四年内花费五千万美元。虽然私人方面的希望和热情是为了早日证明可实用的聚变发电, 但是, 在军事应用部管理之下的原子能委员会研究的重点尚未在军事目的和民用目的之间划出区别。一项可能的军事应用是一种“纯聚变”热核武器, 即一种不需要铀或钚的武器。

使许多科学家对激光聚变最后成功感到比较乐观的新理论, 是一种爆聚方法。这种方法是把燃料靶丸压缩, 以便它更彻底地燃烧。在几条激光束从多方面击中一块靶丸时, 其外部即电离、发热, 并以高速度冲击在靶丸中心产生大压力。按照加利福尼亚州利弗莫尔的劳伦斯利弗莫尔实验室的约翰·努寇尔斯 (John Nuckolls) 和洛维尔·伍德 (Lowell Wood) 的说法, 一个实用发电反应堆所需要的激光能量可以从以前的估计量减少1000因数, 而达到 10^5 或 10^6 焦耳值。但是, 这仍然远远超过目前可利用的最大激光器的能量, 这个激光器是莫斯科列捷夫研究所 (Lebedev Institute) 的尼古拉·巴索夫 (Nikolai Basov) 和他的同事们所创制的一种九个路径的钹激光器。这种苏联制造的激光器在二毫微秒中能供给600焦耳能量。

直到目前为止的实验中所释放的聚变能总量少于激光能量很多, 但是努寇尔斯和他的同事们估计, 一次恰好补充激光能量的聚变反应能产生 10^3 焦耳。这种名为“不盈不亏” (break even) 的能量平衡通常被认为是判断激光聚变达到科学的可实行性地步的判据。但是, 这可能会是使人误解的一个容易达到的里程碑, 因为确切地说, 只要用开动一个钹玻璃激光器所发射出为电能的0.1%的能量就够了。

虽然不盈不亏 (break even) 的取得不会预兆实用激光聚变的即将到来, 但是大多数观测人员一致认为, 按不盈不亏 (break, even) 电能标准的实验正是所需要用以核对激光一靶丸相互作用的繁难计算法和查明许多可能的物理机制中哪一种是最重要的。例如, 加热和压缩的细节只能从高度非线性计算预测出来, 而这些计算具有很大的积累效应的不确实度。

关于激光一靶丸相互作用物理机制的大部分诊断材料, 是从测量反射的激光总量和在聚变中产生的中子数量得到的, 而这两项都是相互作用的比较原始的量度 (某些科学家认为关于中子产额的材料差不多是无用的)。显然, 没有一项美国实验曾用过一个能发生爆聚的激光结构。在利梅尔 (Limeil) 的法国科学家们有一种能在氘靶上产生150焦耳的四路径激光器, 但是大多数观察家们相信, 现在只是列捷夫研究所的那群人有能力开始实验爆聚理论。一个正在建造中的二十七束光的激光器被人们推测能产生约 10^4 焦耳, 并且可能是第一个能得到不盈不亏反应的工具。

美国各实验室的研究计划的特点大致可分为两种: 一些着重于时间变化, 一些着重于波长变化。在利弗莫尔和KMS聚变的研究人员打算用很细心从时间来调整激光脉冲的方法来最大限度地增大压缩。在一些实例中, 用一种小的前驱脉冲在靶丸外部产生一稀薄等离子体。稀薄等离子体内的某些效应增加爆聚的对称性, 从而可以达到高压强。

在洛斯阿拉莫斯科学实验室、罗彻斯特大学、桑迪阿实验所 (Sandia Laboratory) 以及利弗莫尔的研究人员们, 计划用与钹激光器近红外辐射 (1.06微米) 不同的波长进行实验。在利弗莫尔和利梅尔所做的等离子体的计算机模拟表明, 为产生聚变可能需要短于1微

米波长的辐射。较短波长的激光脉冲被吸收于靶丸中深得多，因而更有效地引起爆聚。

虽然钕激光器是强力短脉冲的最好能源，但是大多数观察家怀疑，由于它们的效率太低，究竟能否可以用它们来开动一个发电装置。另外，有几个科学家则相信更进一步的发展会比提高它的效率一倍有更好的作用。钕激光器还不易按高速重复率操作，而在利弗莫尔和洛斯阿拉莫斯的科学家们都估计一个有效用的发电装置需要每秒一次或更快一点的发射的快速重复率。在目前的工艺技术情况下，钕装置的实用耐久性也还差得太多。

另一种可采用的装置是二氧化碳激光器，它能在很短时间以10—20%的效率发出强功率的脉冲。虽然在洛斯阿拉莫斯科学实验室用一个原型二氧化碳激光器所得到的最大能量为一毫微秒脉冲8焦耳，但是在那里的基斯·博伊尔(Keith Boyer)和他的同事们预计到今年冬天将有一个准备运转的1000焦耳装置。可能不容易：得到如钕激光器能发生的那样短的脉冲，但是博伊尔确信用现有技术能够得到0.25毫微秒脉冲。他估计，从一个单路径二氧化碳激光器发出的最大可能能量将达到2000—5000焦耳，比一个单路径钕玻璃激光器所发出的1000—2000焦耳的估计量大一些。当然，如果用一个以上的单路径激光器，总的能量会增加许多倍。

但是，二氧化碳激光器的最大缺点是它的很长波长辐射， $10.6\mu\text{m}$ ，不能很有效地对靶丸加热。计算机模拟表明， $10.6\mu\text{m}$ 的辐射会产生过多的极热电子，它们先加热于靶丸的中央部分，因而难以压缩，或者完全不向靶丸传送能量。关于二氧化碳辐射，还没有做过激光与靶丸相互作用的研究。当时博伊尔和他的同事们认为，制成一个有较短波长的有效激光器的最好方法是转换二氧化碳装置的频率。

目前正在参加原子能委员会计划的各个成员中间进行的关于钕激光器与二氧化碳激光器优缺点比较的详细讨论，这对激光聚变的价值最终可能是多余的。因为不仅从理论推测引起争论的主要论点尚未进行实验核对，而且激光工艺技术中有新的突破，就可以提供一个有适用波长的令人满意的激光器，无论是那一种，这总是会有有的。据目前在利弗莫尔领导激光研究和发展工作的约翰·埃梅特(John Eemmett)说，在激光工艺技术中已经以几乎每年一项重大革新的速度出现了一些突破，并且现在有二十到三十种与二氧化碳装置类似的装置可以发展成为有功效的激光器。他还指出，一个具有短波长的新型高压气体激光器显出大有希望的例子是，在利弗莫尔的研究人员最近已成功地开动一个高压氙激光器，它发射 $0.16\mu\text{m}$ 的辐射，并且在理论上能发生达到90%效率的功用。

关于聚变反应堆的工程设计的研究尚少，因为可以确定的设计标准太少，而且已做过的研究多着重于一般性情况。有些问题对磁约束方法和惯性约束方法是共同的，因为一种氘—氚混合物肯定是在这两种方法中最初使用的燃料。反应堆的大小在许多方面将根据对有一公尺厚的锂层的需要来决定，这一锂层是为了吸收反应中产生的高能中子(在氘—氚反应中产生的中子具有 14.4×10^6 电子伏特(14.4兆电子伏特)的能量，而从核裂变产生的中子则只有约2兆电子伏特)。由于氘的天然丰度很小，新的氘必须经过锂壳层中的核反应来产生，然后收集起来以补充已烧完的燃料。但是，氘是放射性的，能取代任何分子中的氢，因此必须小心处理，以免与任何水源接触。这些问题将在以后的一篇关于用磁约束核聚变的装置产生的能势的论文中更详细地讨论。

然而，有几个工程技术问题则是激光—靶丸聚变计划特有的。除了一个激光器必须具有很大耐久性这个肯定的重要问题外，还需要有很坚固的阻止壁来包容爆炸。可以用钢制成球形容器，其厚度足以经得起比较小的 10^9 焦耳(500磅三硝基甲苯的当量)爆炸，但是必须设

法把锂包含进去以保护结构部份不受辐射损伤。在洛斯阿拉莫斯做的激光反应堆可实行性研究指出，这个问题可以用建造一个双壁外壳并在两壁之间注入液态锂的方法解决。如果内壁被穿孔，则液态锂就流过去来复盖其内面，这层液锂可以保护它不受X射线和爆炸靶丸物质的侵蚀。液锂的贮存器（在其中中子能被转化为热）必须大得足以保证继续不断地向蒸汽涡轮输送热流，即或聚变爆炸是间断性的。

橡树岭国家实验室的阿尔特·弗拉斯和他的同事们曾提出一种激光反应堆设计，它也用液态锂作为聚变能的主要吸收介质，但是他们的理论排除了一层内壁的需要，而用充分高的速度打漩锂来保持一个自由固定的涡流。然后把燃料靶丸喷入涡流内，在它们到了容器中心时再点燃。橡树岭的研究组还打算向循环着的液态锂注入细小的惰性气体泡，来缓冲阻止器受爆炸的压力。

两种反应堆的设计都是余暇时间的努力成果，因为尚未解决的问题仍然是，用激光产生核聚变是否可能，而且关于如靶丸的理想尺寸之类的一些基本问题，在各种研究人员中间意见有相当的分歧。利弗莫尔的努寇尔斯和他的同事们赞成用一毫米大的靶丸，它可以释放约 10^7 焦耳的能量；而洛斯阿拉莫斯的报告以及橡树岭和罗彻斯特大学的研究人员们都选用约一厘米直径大的靶丸。虽然较大的靶丸可能燃烧时间比较长，但是需要更多的激光能来点燃聚变反应，因而扩大现在可利用的激光器与将需要的激光器之间的间距。较小的靶丸所释放的能量如当作电出售，其价值不过一分钱。显然，经济上可实行性问题之一是要生产便宜的靶丸。

技 术 问 题

如果激光聚变和磁约束聚变都证明可以实行，则以激光为基础的反应堆的某些方面似乎比较有吸引力。大多数研究结果估计，其50—200兆瓦的电功率，比所估计的托卡马克聚变反应堆的500—2000兆瓦少得多。在实际应用上，激光装置作轮船发动机用，其尺寸会是合适的。许多小装置可以聚集成组，或许用一个激光装置来开动，或者把小装置按地区分布，向住宅和工厂供给电能。如果把许多小装置合并成一个组件系统，则个别单元可以关闭以备替换被辐射损坏的部分，不致显著地影响发电。据阿尔特·弗拉斯说，一个激光聚变反应堆的基建费和发展费显然都比较低。

但是，与磁约束装置比较，对激光装置的充分研究还少得多，并且只是由于这种理论比较新，似乎问题尚少。按照某些有专业知识的观察家们的估计，单是激光器的工艺技术问题就会证明与创制一个完全的托卡马克反应堆同样困难。当然，取得 10^5 或 10^6 焦耳级的能量是困难的，但是，解决了这个问题以后，把重复率增加到每秒发射一次的问题似乎更棘手。

（美国海军科学实验室的激光器的重复率约为每4分钟一次！）为了保护激光器在靶丸爆炸过程中不被破坏，曾有人建议采用可自由使用的反射镜或液态金属镜（以消除靶丸与激光器之间的一切直接路径），但尚未进行任何试验。橡树岭和洛斯阿拉莫斯的反应堆结构似乎都不特别适用于应付靶丸的多光束照射，虽然据推测进行多方面的更改是可能的。

作为一个最根本的资源，只有日光的资源胜过聚变所产生的可利用能，而且它就是从一个大的很多的贮存库产生的聚变能。在几种可能的聚变循环中，氘-氘聚变循环是唯一受到资源的间接限制的，因为地球上的锂必须开矿才能不断制造更多的氘。但是，据洛斯阿拉莫斯的报告，已查明的全世界锂藏量大得足以供应能的需要一百万年，即或世界人口达到一百

亿，并且每人对能的消费相当于美国的1970年比率。

虽然激光聚变的爆聚理论很引起注意，但是可以预料得到的技术问题的数量显然很大，即或其“物理学”被查明是有希望的。由于解脱了对磁场的需要，激光方法还绕过了曾经挫折物理学家们早期为证明可能性的热望的一连串的而且令人沮丧的等离子体各种不稳定性的问题。但是，在科学家们能使氢在反应堆中变得比太阳更热和更浓以前，在激光发展中每年就需要有一次以上的重大突破。

译自：《Science》，1972年177卷 4055期 1180—1182页。

作者：William D. M.

磁约束核聚变：前途如何？

在原子时代初期，有人认为产生氢弹的反应作用如能加以控制会成为一种很大的能源。有一个时期，人们设想关于核聚变反应堆的研究会迅速进展，从而有可能代替第一代增殖型裂变反应堆。但是，这种过早的计划未免过于乐观。在五十年代初期，没有人知道向核聚变反应堆发展会是多么缓慢，因为只有不多几位科学家认识到，应该首先弄清楚并掌握一个全新科学领域——等离子体物理学——的细节。已经试用过许多不同形状的磁场装置，来观察它们能否胜任约束核聚变反应。但是，迄今还没有一个装置表明产生净能是可能的。

由于在过去四年间一些令人鼓舞的实验所取得的结果，许多科学家们现在认为可能到1980年用磁约束装置就会完成受控核聚变。另外一些科学家曾估计用激光来加热燃料的另一种对核聚变探索方法可能更快地实现（参阅1972年9月29日的Science杂志）。即或磁约束核聚变或激光核聚变的科学的可实行性被证明了，聚变反应堆作为商品出售仍须推迟到实验反应堆已被彻底检验和一个示范反应堆已被证明成功以后。必须开始来估定一个聚变反应堆的大小、建造费、运转特性、放射性危害和环境影响的比较研究，激光聚变在这方面尚在最初阶段，而在磁约束聚变方面则刚成为可以利用。但是，聚变反应堆有两个重大优点是明显的：事实上燃料资源是无限的和没有可能的爆炸事故的危险。

大家普遍认为氢的两种重同位素——氘和氚——是供核聚变用的恰当燃料。氘大量存在于海水中，因而是一种极便宜的燃料（每千瓦小时只需要 3×10^{-6} 美元；但是氚则必须在聚变反应堆内增殖，很象钚能在裂变反应堆内增殖那样。燃烧氘和氚混合物所需的温度如此高，以致没有任何材料能容纳这种燃料而不熔化。但是形态如瓶的磁场能保持燃料不使接触任何器壁。三种类型磁场结构似乎极有希望：环形器（苏联所设计的托卡马克是最有名的实例）、收缩装置和磁镜。

虽然可能没有把握，但有理由使人相信把这三种装置加大就足以证明科学的可实行性。然而这不会是省钱的。美国核聚变研究计划需要在1980年建成全部三种装置的费用总数约达十亿美元，而且原子能委员会的某些官员曾估计，根据任何一种构型建造一个实验反应堆约需五十亿美元。但是，为原子能委员会受控热核反应堆部门所准备的1973年会计年度的预算不过是四千万美元。

反应堆构型问题

由于以前已经讨论过关于磁约束核聚变的概念和各种计划的情况（参阅1971年5月21日和8月27日的Science杂志），本文将集中于建造一个实用反应堆和如果核聚变构成一个主要能源将对环境造成什么影响的问题。

聚变反应堆的最新设计是以磁约束装置的托卡马克构型为根据的。托卡马克的燃料是每三分钟注入一个环形室来加热并压缩成为稠密等离子体以引出核聚变。为了吸收聚变反应所产生的能和增殖新的氚，必须用约一公尺厚的锂或锂盐的壳层来包围内室。在锂壳层外面必

須加上一个用水或其他吸收中子的物质构成的比较厚的防护屏，来保护多层组件外边的超导磁场线圈。环形反应堆是一个庞大装置，其管半径约为五公尺，环平均半径则超过十五公尺。

聚变反应堆的许多设计参数正在改变。最初设计研究假定一个根据托卡马克型的反应堆能有五千兆瓦的电功率容量，但是通过内壁的中子通量是那样巨大，以致没有任何材料可被认为会保持足够长时期的实用而不损坏。美国田纳西州橡树岭国立实验室(Oak Ridge National Laboratory)的阿尔特·弗拉斯(Art Fraas)最近做的设计，具有低得多的总功率约五百兆瓦和一个相应低的中子通量。虽然低功率反应堆似乎麻烦的材料问题较少，但是基建费和运用费肯定更高，因为很费钱的磁场不能得到充分有效的利用。但是，据原子能委员会受控热核研究部代理主任罗伯特·赫希(Robert. Hirsch)看来，改进大量生产大型超导磁场和效率的工艺技术就能补偿磁场增加的费用。现在一切费用都十分不确定；只超导磁场一项的估计费用就达到每千瓦电容20—60美元。

设计一个聚变反应堆会遇到许多困难的工程技术问题，因为温度和中性通量必须保持在很短距离内有很大差别。举例来说，中心的温度将达到 $100 \times 10^6^\circ\text{C}$ ，而中性通量则每秒每平方公分将大于 10^{13} 中子；但是，在仅二公尺距离处，即超导磁场的位置，中性通量和绝对温度都必须差不多是零。

最困难的工程技术问题之一是内壁材料的选择。它应该对很热的液态锂(1000°C)不起反应，并且要在极大中性通量中保持10—20年不损坏。(在用液态金属冷却的快中子增殖裂变反应堆标准结构中的中性通量要大几个量级，但是，氘-氚聚变反应所产生的更高能量的中子对结构有更多的破坏作用。)

壳层需要用纯锂，因为它比锂盐能更有效地增殖氘，但是把液态锂泵送经过整个装置是很烦难的。由于液态锂是一种导体，它只能在没有磁场的阻力下向一定方向泵送。从反应堆抽出热量的其他方法，例如用氨泵送通过锂壳层，正在研究中。

在壳层外部需要有一个防护屏，以保护超导磁场线圈不受热、快中子和X射线的损坏。抵抗中子的有效防护屏是一公尺宽的水，但是，如果锂与防护屏内的水接触，就要发生剧烈反应。某些工程师们认为，供作防护屏用的另一种如石墨之类的材料是一种较好代用品。

虽然任何反应堆都是精心设计的，从而可以减少任何装置不准确操作的几率，但是对磁场装置发生事故的危险仍是很大的，因为积蓄在磁场内的总能量约为 2×10^{11} 焦耳，相当于一次平常闪电的能量。更大的危险是液态锂的起火。

聚变反应堆所产生的热致污染可能少于用矿物燃料的工厂，因为高的运转温度会使大量热能转化效率成为可能。弗拉斯所拟订的设计，用一种蒸汽发生双循环方法能把55—60%的热能转化为电能——一个用矿物燃料的现代发电厂只能转化40%。但是，供给一个为注入燃料用的等离子枪需要多少能量尚不清楚，而且还会显著地降低效率。

可能的氚危害

许多核聚变的提倡者曾表示，通过热循环把聚变能直接转化为电能，可以得到很高的转化效率。如果等离子体中的带电粒子通过一个电场或磁场，就能产生电。但是，用最适于核聚变用的燃料——氘-氚混合物——做直接转化是最少有效果的，因为带电粒子只释出20%的能量。根据美国马萨诸塞理工学院(Massachusetts Institute of Technology)的戴

维·罗斯的研究,其他燃料如氘加氘或氘加氦-3的直接转化的可能性尚未得到证明。一个磁镜或收缩型聚变反应堆的直接转化室是一个直径约为一百公尺的巨大圆盘,可是要回收已消耗的等离子体则很困难。

聚变反应堆的最大危害——无论是磁约束型,还是激光型——无疑是挥发性和放射性燃料氚向周围环境的释放。氚的半衰期比较短,约为十二年,但是它传布得很快,因为它是一种轻气体,并且因为它能置换如水之类的分子中的氢。然而,与许多裂变产物比较起来,氚的放射性(低能量 β 发射)比较柔和,而且一个聚变发电厂中的氚的总量所造成对生物的危害,比一个裂变发电厂的挥发性产物(碘-131)的总量所造成的危害少得多(参阅参考资料1)。

关于氚的问题,是它很难包容,并且按照最乐观的估计,每年总量有至少0.03%从反应堆逸出。根据戴维·罗斯的估计,有更大量的氚会穿入结构组件,但在正常情况下并不逸出。适于做反应堆构件的大多数金属,在聚变反应堆的运转温度下,对氚易于变得可渗透。弗拉斯在对氚危害性所做的初步鉴定(1)中,估计有六十居里的氚通过蒸汽循环以水的形式放出。水里的氚比气态的氚危害性大得多,因为它会更迅速地被人体同化。弗拉斯认为,如果把包含反应堆的整个房室抽空,则氚的释放总量可保持在一居里。但是,他强调说,现在任何关于氚释放的估计肯定是不确实的,因为供这种计算用的许多必需数据尚在未知之列。

关于核聚变发电尚未解决的问题之一是,氚的危害性是否小到足以容许把聚变反应堆设置在城市中间,因为在这些地方需要大量电能,而且可以把余热出售供工业和家庭利用,免得排出造成热致污染。据罗伯特·赫希说,如果聚变反应堆有一个排气管,任何人在地面上所受到的最高侵害量不过是目前原子能委员会所规定的耐受量的五分之一。这项估计是令人欣慰的,而所假定的漏泄率则接近在任何工艺技术中已达到的最好标准。因为一个聚变反应堆的氚的总存量约达 10^8 居里,在已积累丰富操作经验以前,将不会把反应堆设置在市区。

一个燃烧氚的聚变反应堆可能在很遥远的将来实现,但它不是在氘-氘聚变反应中产生的。可能一个氘-氚反应堆中的氚总量差不多与一个氘-氚反应堆中的同样大。因此,氘-氚聚变反应堆的显著优点不只是它对环境的危害性小,而且由于事实上有一个廉价燃料的无限来源,因为海水中的氘可以供应全世界的电能需要十亿多年。

虽然氘-氚聚变反应堆不是完全没有辐射问题,但是许多观察家们相信,在燃料循环期间氚的总放出量并不大于裂变燃料循环期间的氚释出量,后者大都是在燃料棒再加工过程中发生的。另外,由于聚变反应堆会增殖它自己的燃料——并且立即燃烧它——因而不需要大量运送放射性燃料。氘-氚聚变的唯一产物是非放射性氦。聚变反应堆的唯一显著放射性残物是内部结构的组件,如果它们是用铌制成的,会迅速冷却,并且作为废物处理也是易于解决的问题。

即或在聚变反应已停止时,结构组件中的放射性也会产生一定的热量,但是这个热量比裂变反应堆的“余热”少得多,因而不必担心如果冷却剂的流动中断时会对反应堆造成任何损坏。

聚变试验的方向

美国研究的现况如何?显然,如托卡马克大型环形装置最接近可实现性;因此,投入对托卡

马克研究的经费比其他结构设计都多。关于这种装置的课题是要保持等离子体的纯度和对它加热。现在正加强试验至少三种加热方法，初步结果表明其中之一，用压缩加热，很可能会成功。现在普林斯顿等离子体实验室（Princeton Plasma Laboratory）正用绝热的环形压缩托卡马克进行试验。

磁镜装置只是在能保持静止的等离子状态时才有效用。现在正试验三种探索方法；其中有希望的一个（劳伦斯利威莫尔实验室Lawrence Livermore Laboratory的垒球一号）是用中子束加热。如果能保持静止状态和如果等离子体通过磁镜两端的损失量与理论符合，下一步就需要用一个足够大的装置来证明可能性。但是，还需要充分地加浓中子束。

如在洛斯阿拉莫斯科学实验室（Los Alamos Scientific Laboratory）所采用的锡拉克（Scyllac）装置之类的大型收缩装置，将在1975年完成彻底的试验。但是，这类装置将因需要迅速供给大量动力而受到限制。现有的动力源，电容器组合，不足以供应一个证明可实现性的装置。如果锡拉克装置证明成功，就需要另一种动力源（例如大型电感器）和分两个步骤的压缩和加热。

在用磁约束核聚变的研究工作中，最近还未出现惊人的突破，受控核聚变仍远不是一件确实的事情。但是，许多科学家们认为，科学的可实行性的问题将在本十年代里得到解答。如果核聚变实现，有些观察家们预计商用发电厂将会迅速发展。但是，另一些人则指出，与裂变发电的历史对照（从裂变连锁反应的概念到用一个固定在木结构中的简单石墨组件证明科学的可实行性，其间的过程不到三年），从为证明核聚变可实行性的研究开始已用去差不多二十年。如果可实行性实验的复杂性有点表明一个未来的聚变反应堆的牵强附会，那么，一个商用反应堆的出现可能会象朝向证明这个原理的进度那样停滞不前和令人生厌的。

译自：《Science》，1972年178卷4058号，291—293页。

著者：William D. Mety.