

热核反应与室温下的核聚变

王德云

世界上第一颗氢弹爆炸标志着轻核聚变的成功，这一聚变是在上千万度的高温下完成的，因此，轻核聚变过程又称为热核反应。这一声巨响，为人类探寻新能源开拓了美好的前景。氢弹爆炸是一种不可控的热核反应，人类为了和平利用聚变反应能就需要实现可控热核反应。从第一颗氢弹爆炸到现在的几十年间，人们一直在努力研究探索实现这一目标的途径，这是当今物理学领域中最重大课题之一。

实现可控热核反应，需要满足四个方面的条件。

1. 高温 T 。轻核聚变原料主要是氢的同位素——氘 (${}^2\text{H}$) 和氚 (${}^3\text{H}$)，要实现聚变反应需要克服质子间库仑斥力的作用。为克服这一库仑作用，每个氘核至少要具有 72 千电子伏的动能。若把这个数值看成是氘核的平均平动能 ($3/2 kT$, k 是玻尔兹曼常数, T 是温度)，那么达到这一数值相应的温度可高达 $5.6 \times 10^8 \text{ K}$ 。既使考虑粒子的运动遵从麦克斯韦分布和隧道效应，聚变时的温度也不会低于 10^8 K ，这仍然是一个非常高的温度。在这样的温度下，原子已经完全电离，形成了等离子体。由于轻核发生聚变时必须高温下才能实现，这就是热核反应名称的由来。

2. 等离子体要有足够的密度 n 。聚变反应产生的能量是与等离子体密度的平方成正比，而韧致辐射也是与等离子体密度的平方成正比。因此，为了有足够数量的等离子体发生聚变，使其释放的能量能够补足系统的消耗，保证反应持续下去，等离子体就要有适当

的密度。在 10^8 开的温度下，如果压强为 15 个标准大气压，等离子体的密度 n 一般为 10^{21} 个/厘米³。

3. 要有一定的持续时间 τ 。等离子体在满足温度和密度要求的情况下，还要使反应维持一定的时间，通

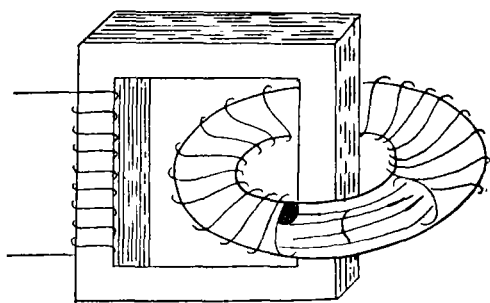


图1 托卡马克(环流器)装置示意图

常称为持续时间 τ 。氘-氘反应的持续时间 $\tau = 0.1$ 秒，氘-氚反应则为 10 秒。

4. 要有一个“容器”。要使高温、高压、高密度的等离子体聚积在一起，而且还要持续一定的时间，需要选择什么样的“容器”才能满足这个条件呢？这正是当今世界科学技术攻关的一个难题。就目前的情况来看，实现热核反应的主要途径有：

(1) 引力约束聚变。太阳内部进行的聚变反应就是依靠太阳的巨大质量把处于高温(约 10^7 开)的等离子体约束在一起而实现的。尽管反应速度缓慢，但

室，他还是俄国著名的诗人、历史学家和语言学家，人们称颂他为“全才科学家”。

摘拿“天电”的勇士

一七五二年七月一个雷雨天气，一位 46 岁的美国人冒着生命危险来到费城郊外，做了一项惊人的实验，他用金属丝系住一个很大的风筝，把风筝放入电闪雷鸣的空中。他的目的是为搞清楚空中的闪电和莱顿瓶中的电本质上是不是一样的。他在金属丝的下端拴了一段绳子，金属丝末端挂了一串钥匙，一手拉住绳子，一手轻轻地碰触钥匙，只见手指和钥匙间发出了小火花，跟他在莱顿瓶实验中的现象一模一样。同时他把神秘而又令人畏惧的“天电”引入到莱顿瓶中，幸亏那一瞬间云中的电并不很强，才使这位勇士成功地完成了科

学史上著名的费城风筝实验。这位为科学勇于探索和献身的人就是美国伟大的科学家、政治家本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790)。 (见封四图 13) 一九五六年是富兰克林 250 周年诞辰，美国专门发行了一枚富兰克林正在做风筝实验的邮票 (见封四图 12)，以缅怀这位科学伟人。富兰克林不仅证明了“闪电”与普通电火花具有同样的特性，1753 年他发现了尖端放电现象，进而发明了避雷针，为人类征服“电老虎”做出了杰出的贡献。富兰克林还是美国的开国元勋之一，1776 年参加了美国的《独立宣言》起草工作，他还参与制定了美国第一部宪法。图 10, 11 (见封四) 是法国和美国 1976 年为纪念美国建国二百周年而发行的邮票，上面都有富兰克林的肖象，邮票上的地图是 1776 年的北美地图。

由于太阳的质量巨大,因而释放出来的能量仍是相当可观的。对于这样的低速反应,在地球上还不可能建造一个反应堆,把这么高温的等离子体约束那么长的时间,这只有巨大的星体才具备这样的条件。

(2) 惯性约束聚变。氢弹从本质上讲,就是利用惯性力把高温等离子体动力性约束,即所谓惯性约束。怎样才能用人工可控制的方法来实现惯性约束呢?目前考虑的办法是利用激光产生惯性约束。在一个直径约为400微米的小球内,充以30—100大气压的氘和氚的混合气体,并加进适量的 ^{235}U ,用大功率的激光从四面八方照射小球。由于小球的外层突然加热而发生膨胀,于是就挤压内层材料,使小球的内径可以缩小20倍。在高度压缩的情况下,首先实现裂变链式反应,从而提高小球的温度,进而引起聚变发生。这种约束方法虽然尚处于实验阶段,但仍是一个富有希望的重要途径。

(3) 磁约束聚变。磁约束的研究已有三十余年的历史,是研究可控热核反应最早的一种途径,也是目前看来最有希望的途径。在种类众多的装置中,希望最大的应属托卡马克型核聚变试验装置,又称环形管聚变反应器,简称环流器。装置如图1所示。环流器的主机由真空室、环向场线圈、加热场线圈和平衡场线圈等构成。真空室是一个金属环形圆管,实验前先将真空室抽空到 10^{-8} — 10^{-9} 毫米汞高,然后充 10^{-2} — 10^{-3} 毫米汞高的氘或氚。加热场线圈相当于一个变压器的初级线圈,真空室相当于变压器的次级线圈。当加热场线圈输入脉冲电流时,真空室内由于电磁感应产生的放电电流使真空室内气体电离成等离子体,并使温度升高。环形的磁场线圈产生沿真空室环形圆管轴线方向的强磁场,带电粒子在强磁场中受到洛仑兹力的作用而绕着磁力线运动,因而在与磁力线垂直的方向就被约束住了。平衡场线圈产生的平衡场可以进一步防止等离子体因放电而发生向外侧漂移。

美国普林斯顿的托卡马克聚变试验堆(TETR)

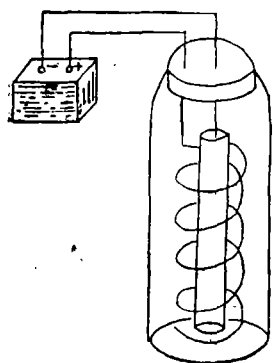


图 2

1988年底启动,等离子体温度高达1亿摄氏度,其密

度足够保持聚变反应的稳定性,这个聚变装置正朝着实用方向迈进。

欧洲用最新工艺安装的托卡马克聚变试验装置(JET)已经投入使用,它能够创造发生核聚变的三个条件:温度达到1.5亿摄氏度,持续时间达到1.2秒,等离子体密度也达到了要求。

我国可控热核反应的研究早在五十年代后期就开始了。1976年12月我国第一座托卡马克型聚变试验装置——中国环流器一号(HL-1)破土动工,1984年9月建成,并顺利启动。在世界同类装置中属于先进的托卡马克类型,它的建成使我国受控核聚变这一当代重大科研课题的研究迈出了可喜的一步。

长期以来,对于轻核聚变一向认为是在高温、高压下方能实现;至于常温、常压下,或在低温情况下实现核聚变认为是不可思议的。因此,3月23日美国犹他大学在一次新闻发布会上,该校化学系主任斯坦·庞斯教授与英国南安普顿大学马丁·弗莱希曼教授宣布,他们采用普通的实验手段,成功地实现了室温条件下核聚变。这个消息在全世界引起了强烈的反响。于是,许多国家竞相再现这个试验,短短的一个多月,先后包括我国在内就有十几个国家宣称成功地实现了室温下的核聚变,方法上并有许多创新,这些实验结果对科学界是个极大地鼓舞。

弗莱希曼和庞斯实现室温下核聚变的方法非常简便:在15厘米高的试管内装满含有氘的同位素氘的重水,温度为27摄氏度,试管外面绝缘,试管内插入两根电极——用钨做的阴极和用铂做的阳极,如图2所示。当两个电极间通上电流时,他们惊奇地发现,试管内有大量的能量释放出来,释放的能量为输入能量的4倍,后来又提高到100倍。有一次实验中,使用的设备在强热下熔化了。实验中还发现了氦和中子的数量在增加,这些现象的出现,庞斯和弗莱希曼确信他们的试验实现了核聚变反应,被称为“试管中的太阳”。

印度英迪拉·甘地原子研究中心进行的实验中,使用价格比较便宜的金属钛代替钨做阴极,也宣称成功地实现了核聚变。

阿联酋和埃及的两名科学家利用普通的海水代替重水,在室温下也实现了核聚变,只是释放的能量要比重水少一些。

不仅室温下可以实现核聚变,在低温条件下亦可简便地实现核聚变。以意大利物理学家斯卡拉穆奇为首的研究小组,将钛浸泡在含有氘的重水中;并加以高压(约8个大气压)和低温(零下120摄氏度),使液体成气态。于是,氘向钛的结构中渗透,发生核聚变,每秒钟可释放出数百个中子。

室温或低温情况下实现核聚变,对这一试验结果科学家们有许多不同见解,有待于深入研究。