

话说 ITER——纪念核聚变研究 50 周年

杜钧福

进入 21 世纪以后,科技方面的一大新闻就是中国加入 ITER。ITER 是国际热核实验堆的意思,是一项热核聚变研究的国际合作研制的大规模科学工程。

聚变反应是轻原子核聚合释放出核能的反应。聚变研究有着非常具体的目标,就是实现受控聚变反应以解决能源问题。在目前,研究对象为以氘和氚为燃料的核聚变反应。这一反应式为 $D+T\rightarrow{}^4\text{He}$ (3.52MeV) + n (14.06MeV), 括号内为反应产物携带的能量。这一反应产生氦离子(就是 α 粒子)和中子。带电的 α 粒子被约束在磁场中,而高能中子则逸出反应区。

实现聚变的具体方案有磁约束聚变和惯性约束聚变。磁约束聚变使用磁场约束高温等离子体;惯性聚变则用强激光聚焦加热燃料靶丸。

这一研究有一些判据性的指标,例如在磁约束反应器里的反应输出能量和输入能量之比 $Q=1$,称为得失相当。更高的指标是仅用约束在装置中的反应生成物 α 粒子加热而无须输入能量就可维持反应进行,此时 $Q=\infty$,称为点火。得失相当和点火分别要求等离子体参数到达一定指标。比较常用的是用三乘积 $n\tau T$ (分别为密度、能量约束时间、温度)作为重要判据。能量约束时间表示装置绝热的性能,主要和输运过程有关。

受控核聚变研究的思想起源很早。人们从 20 世纪前半叶就开始考虑开发核能,在第二次世界大战时期用于军事领域,即爆炸了原子弹,为不可控的裂变反应。战后美苏等国又研制了不可控的聚变反应——氢弹。同一时期还建立了裂变反应堆。下表为上述几件事情发生的年代及逻辑关系。

	裂变	聚变
军用	原子弹 (1945)	氢弹 (1952)
民用	裂变堆 (1954)	聚变堆 (?)

完成这几件事后,下一步的目标显然就是聚变反应堆了。而且,无论从哪一个坐标外推,聚变堆的实现也不应该很遥远。所以我们可以理解,当时是如何迫切希望能在短时期内获得聚变能源,也应

该原谅一些科学家当时所做的不切实际的乐观预言,例如在 1955 年第一次和平利用原子能国际会议上,大会主席、印度科学家巴巴预言:将在 20 年内实现受控核聚变。到了 1958 年的第二次和平利用原子能国际会议,调子就有所改变了。人们开始认识到工程上的艰巨和物理上的复杂,认为这不是一个能在短期内完成的任务,研究题目转向更基础的项目。正是在这次会议上,各国将研究成果解密,公布了一批理论和实验结果,从此开始更密切的国际合作。聚变界常常将此年当作聚变研究的起点。国际原子能机构将在今年纪念聚变研究的 50 周年。

在聚变研究初期,提出了各种不同类型的磁约束装置,并进行研究。这是聚变研究的战国时代。20 世纪 70 年代以后,研究重点才逐渐集中到托卡马克类型装置上。托卡马克是苏联科学家提出的装置,是一种强磁场环形等离子体装置,其中流有环向电流,所以又称环流器,其主要结构见图 1。中心螺线管起变压器初级线圈的作用。外线圈的一部分也作为初级线圈,另一部分用来维持等离子体平衡。而等离子体相当于变压器的次级,在其中感应产生大的等离子体电流并对其加热。装置另一重要部件是环向磁场线圈,它产生和等离子体环平行的强磁场以约束等离子体。当然,等离子体要置于环形的真空室中。

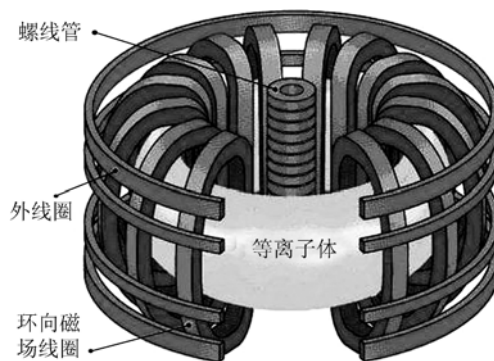


图 1 托卡马克装置主要部件示意图

磁约束聚变研究进入以托卡马克为主线的发展时期后,逐渐摆脱研究初期的不确定局面,并总结出以定标律为准则的发展模式。所谓定标律,是指

用装置参数（如等离子体尺寸和形状、磁场强度、等离子体密度、等离子体电流强度、加热功率）表达等离子体参数的经验公式（如温度、能量约束时间、聚变功率）。这种公式从上一代装置上总结出来，再在下一代更大的装置上验证、修正。图 2 的横轴为以这种定标律计算的聚变功率数值，纵轴为实际达到的值。不同的符号代表不同实验装置上的结果。从这个经验公式和将建的 ITER 工程参数外推，可以得到该反应堆可以输出的聚变功率。

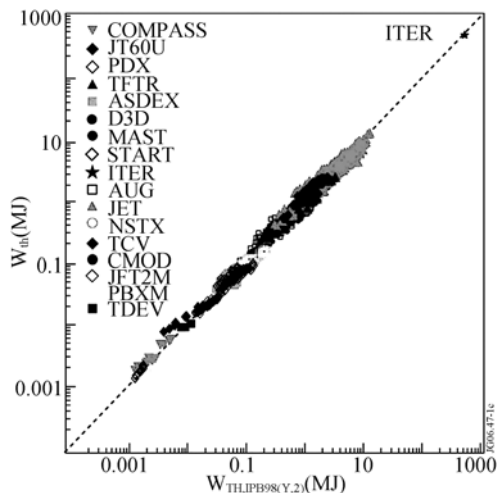


图 2 托卡马克聚变功率的定标律

20 世纪 90 年代，在几个大装置上得失相当的目标已实现，认为受控聚变的科学可行性已达到。下一步应重点考虑工程实现方案。为达到高的指标，装置的建造成为工期长、成本高的大工程问题。在这种情况下，国际合作就成为必然选择，于是诞生了国际合作的 ITER 计划，它所建议实验堆（图 3）的主要参数是大半径 6.2m、等离子体小半径 2.0m、

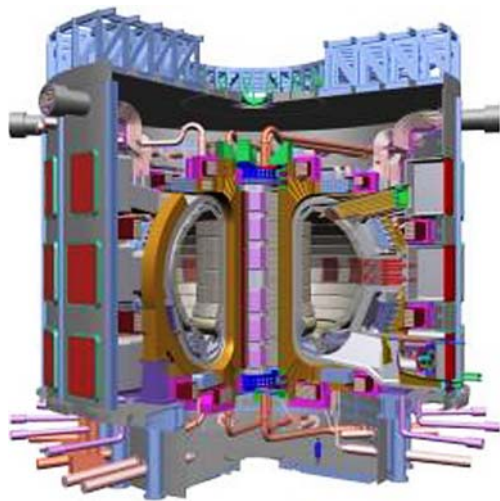


图 3 ITER

环向磁场 5.3T。工程上要实现的目标是：产生和维持 $Q = 10$ ，维持 400 秒的用欧姆变压器感应驱动的燃烧等离子体；检验主要聚变堆技术；堆部件试验，包括燃料氦的处理。

该装置于 1985 年提出，1988~1990 年为概念设计阶段。1992~1998 年为工程设计阶段。后来又根据高约束模式的定标修改了设计指标，缩小了尺寸，并进行了部件试制。2005 年，决定选址在法国的 Cadarache，2006 年，日本、欧洲、俄国、美国、中国、韩国和印度七方正式签订建造该装置的协议。该装置预计用 10 年时间建成，计划运转 10 年。

至于 ITER 以后的前景，有人提议在这一计划完成之后建设一台能连续输出电能的实验电站 DEMO 作为今后聚变电站的样机。其尺寸较 ITER 大 15%，等离子体密度大 30%， $Q = 25$ ，输出聚变功率 2GW（ITER 为几百 MW），为现代电站水平。目前这一装置正在进行概念设计。在 DEMO 之后，预计可以开展商业堆的设计和建造。估计其成本为 DEMO 的 1/4。

在开展工程和物理研究的同时，对于聚变堆在经济、环境、安全和社会各个方面作用的评价也在进行。现在看来，如果计及治理化石能源（煤、石油、天然气）污染的投资，在几十年后聚变堆发电的价格是可以和化石能源比较的，预计可被社会接受。

托卡马克类型装置虽然取得很大进展，预计第一台商业堆也可能是托卡马克型的，但是作为反应堆的托卡马克有许多缺点。作为其主要特征的欧姆加热电流必然是脉冲工作的，而且单纯的欧姆加热不可能达到聚变温度，因此必然要发展大功率的辅助加热和非感应电流驱动。此外，也必须防止磁流体不稳定性产生的等离子体破裂现象。其他类型的磁约束装置也在研究之中，且取得了一些进步。事实上，不同类型的磁约束装置有一些共同的物理问题。ITER 的建造不仅是托卡马克型装置的研究成果，也是所有磁约束装置的研究成果。

目前所达到等离子体参数仅次于托卡马克的是仿星器。这种装置没有环向电流，容易实现稳态运行。一般用电磁波注入产生和加热等离子体。它不是轴对称的，线圈形状复杂，要求加工精确程度高，因此工艺复杂。但是因为无环向电流，物理上比较简单。作为环形等离子体装置，它和托卡马克有很

多共同的工程物理问题。如果建堆，它的尺寸还要比 ITER 大得多。为缩小尺寸，还应做得更紧凑。一台紧凑型的仿星器 NCSX 正在美国普林斯顿实验室建造中，其线圈和等离子体形状如图 4 所示。

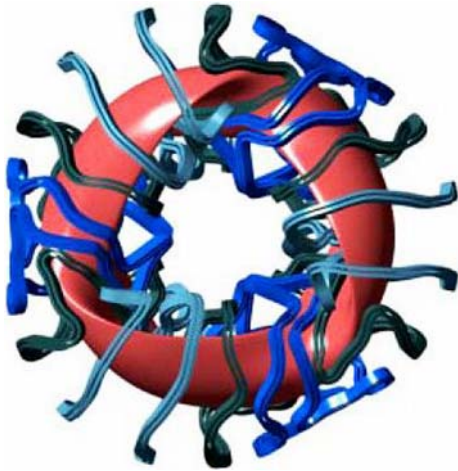


图 4 紧凑型仿星器 NCSX

近年来发展较快的另一种装置称球形环，又称球形托卡马克，是一种低环径比（环形等离子体大半径与小半径之比）的托卡马克。图 5 为它和托卡马克等离子体形状的比较。球形环等离子体的形状像一个去核的苹果。磁力线和沿磁力线运动的带电粒子（电子和离子）更多地停留在磁场强的芯部，所以它能更充分地利用磁能，达到较高的温度密度和电流密度。缺点是等离子体的中心孔过于狭窄，使欧姆变压器的中心螺管效率很低，等离子体电流的启动也很困难。

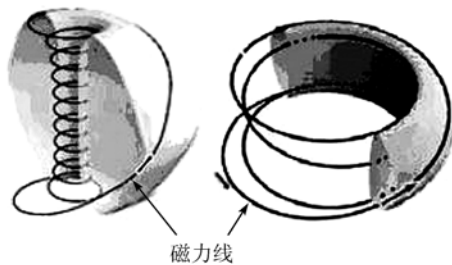


图 5 传统托卡马克和球形环等离子体形状及磁场形态的比较

球形环研究开始于 20 世纪 90 年代，但进展最快。除传统托卡马克外，其达到的参数水平仅次于仿星器。对于输出同样功率的聚变堆，预计球形环的尺寸仅为传统托卡马克的一半。所以球形环的进展使聚变堆的前途产生了变数。

我国的磁约束等离子体物理和聚变研究在近年来取得很大进步，为国际学术界所瞩目。2002 年，核工业西南物理研究院建成我国第一台具有偏滤器

（一种排除杂质的装置）的托卡马克 HL-2A，其主要参数为大半径 1.65m、等离子体小半径 0.4m、环向磁场 2.8T、等离子体电流 480kA。在 HL-2A 和中国科学院等离子体物理研究所的超导托卡马克 HT-7 上都取得了丰富的实验研究成果。

2006 年在等离子体物理研究所建成国际第一台全超导托卡马克 EAST，其环向磁场和极向磁场都是超导的，EAST 的主要参数为大半径 1.95m、等离子体小半径 0.45m、环向磁场 3.5T、等离子体电流 1MA。EAST 的成功建成，标志着我国的磁约束聚变研究达到了一个新水平。这一装置成为我国具有较高参数的实验平台（图 6），具有开展先进研究课题的能力，特别是在长脉冲放电或稳态运转研究上具有优势。

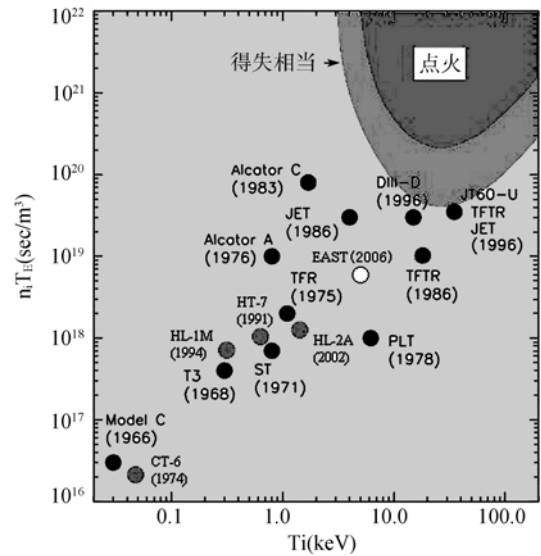


图 6 主要托卡马克达到的指标，EAST 为可能达到的指标

另一方面，随着我国参加 ITER 计划，以及聚变研究的进展，更多的高等学校开展了相应的教学和研究。中国科学技术大学建立了一台稳态环形等离子体装置以研究输运问题。清华大学和中国科学院物理研究所合作，于 2002 年建成一台球形环装置 SUNIST。华中科技大学大学引进了美国 TEXT 装置，用于教学和科研。浙江大学、北京大学、大连理工大学等院校也拟开展数值模拟方面的工作。这对于磁约束聚变研究人才匮乏情况的改善有所裨益。

目前所计划的聚变反应都是所谓氦氖反应。近年来，我国制订了登月计划。宣称其重要目标是从月球上获得氦 3——一种氦的同位素，地球上不易获得，和氘的聚变反应式为 $D+{}^3\text{He}\rightarrow{}^4\text{He}(3.67\text{MeV})+$

期待一个新的黄金岁月（下）

王玉明 张海青 邹浩 译 李学潜 校



四、暗物质

源于超对称的暗物质 令 B 、 L 、 S 分别为重子数、轻子数和自旋，相乘量子数 $R \equiv (-1)^{3B+L+2S}$ 对于所有标准模型粒子来说为+1，对于其相应的超对称伴子来说值为-1。由于 B 、 L 和 S 在很高近似程度上守恒，我们可以预测 R 宇称在很高近似程度上也是守恒的。因此，最轻的 R 为奇数粒子可能非常稳定，在接下来将要讨论的许多低能超对称模型中它在宇宙学尺度下都是稳定的；注意，此结果并不是在任何低能超对称模型中都成立。

如果具体给定一个低能超对称模型，我们可以计算宇宙自大爆炸以后的热过程，并且估算宇宙稳定粒子的残存密度。在相当大的参数范围内，最轻的奇 R 粒子以适当的丰度产生来提供暗物质，而且要求它和正常物质的相互作用非常之微弱（图 14）。

“任务已完成？” 虽然初步的数据鼓舞人心，但它还是太简单，以致无法从中外推出需要的结果。如果在 LHC 上发现了低能超对称及暗物质的候选者，那么将会实施一个重大计划来检验这源于大爆炸的粒子的具体性质是否导致目前观测具有的暗物质密度。这并不仅仅是形式上的检验。因为还有 LHC 观测到的最轻奇 R 粒子的其他有生命力的以及理论上很有吸引力的替代理论，也给出宇宙学观测密度，理论上同样非常有吸引力。我们下面将会解释“过多”与“过少”的超对称暗物质是与重要且很有道理的物理观点相容的。

① 过多？——Superwimps（引力子的超伴子*）：宇宙年龄与 LHC 上能测量的粒子的衰变寿命相差一个很大的空档，因此有可能某种粒子既可以在 LHC

上表现为稳定粒子，通过计算又可知其丰度在当今的宇宙中很大；然而它在现实中并不存在——因为它的衰变寿命处于亚宇宙学时间尺度上。上述可能性并不像乍听起来那么人为或怪异，下面我们给出理由。极微弱相互作用粒子的超伴子，例如引力微子或轴微子，与正常物质的耦合非常弱，以至于在 LHC 上观测不到，他们同样有着奇 R 宇称。这样可以观测到的最轻奇 R 粒子很可能衰变成一个更轻的不可观测奇 R 粒子，其寿命正好补上前述

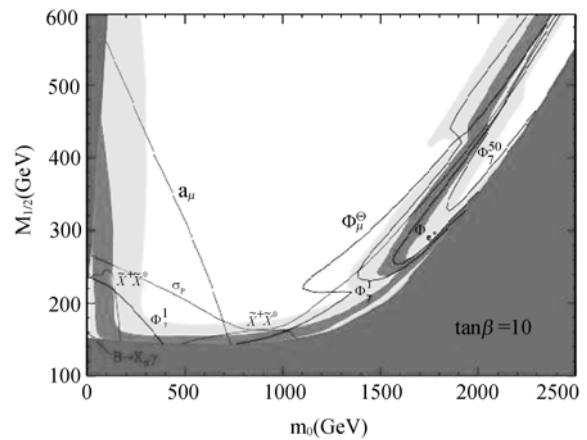


图 14 许多低能超对称模型都给出暗物质候选者 这里画出的是基于最小超引力媒介模型宇宙学稳定粒子产生图，取 $\tan \beta = 10$ ，标量普适范围及规范微子质量 $m_0, m_{1/2}$ 。右下方深色区域因为或是其中的稳定粒子带电的或是其预言的有荷微子应该已被观测到（事实上没有），因而已被排除掉。在中间及上方白色区域里暗物质不是多了（中心区域）就是少了（右边的长条区域）。浅灰色条带显示的是宇宙学感兴趣的适量中性微子暗物质的产生，深色条带中的一些数据已与观测值接近。下面将会给出其中的某些定性描述。

p (14.67MeV)，被称为先进核燃料，因为它的聚变反应产生质子而不产生高能中子。而氘氘反应产生的高能中子辐射在聚变堆结构中的退化效应是目前设计的聚变堆的技术难题之一。但是氦 3 聚变反应要求更高的温度。而在这样的温度下，等离子体在磁场中的回旋辐射能量损失会增加很多。考虑到这

种聚变燃料的特点，可能要研究不同于托卡马克的磁约束装置类型。但目前对氦 3 聚变的研究尚相当于托卡马克研究的战国时期，以及考虑到从月球取回氦 3 的技术困难及成本核算，使用氦 3 作为聚变堆的燃料应属更长时期考虑的问题。

（中国科学院物理研究所 100080）