

核聚变研究的发展历史

朱 士 尧

(中国科学技术大学近代物理系)

当代物理学重要前沿领域之一的受控核聚变研究近年来取得了重要进展。预计今后几年内能够从实验上证明其科学可行性并实现热核点火,这将会在科学史上写下光辉的一页。

早在 1919 年,阿斯顿 (F. W. Aston) 在实验中发现^[1]氦-4 的质量比组成氦的 4 个氢原子的质量之和大约小 1% 左右。根据爱因斯坦质能关系,其质量差恰好等于四个氢原子核聚合成一个氦-4 时释放的能量。卢瑟福也几乎在同一时期证明了足够大能量的轻原子核相互碰撞可以发生核反应。天体物理学家也提出设想:太阳这样的恒星其能量来源于原子核的聚变反应。1920 年,英国天体物理学家爱丁顿 (Eddington) 预言^[2]:“有一天人类将设法把核能释放出来为人类造福”。1929 年,阿特金森 (Atkinson) 和奥特迈斯 (Houtermans) 从理论上计算了氢原子在几千万度高温下聚变成氦的可能性,认为太阳上进行的可能就是这种核聚变反应^[3]。1934 年,奥立芬特 (Oliphant) 发现了第一个 D-D 核反应^[4]。1942 年,施莱伯 (Schreiber) 和金 (King) 在美国普渡大学首次发现了 D-T 核反应。第二次世界大战期间,美国集中了一批来自各国的优秀科学家在洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos) 实验室研制原子弹。在这过程中,他们就开始注意到了核聚变反应的可能性,开展了一些有关核聚变研究的早期学术活动。第二次世界大战结束后,英国和苏联也秘密地开展有关受控核聚变的研究工作。回顾核聚变研究的 40 多年历史,这个过程大体可以划分为四个阶段:第一阶段,发明各种类型的聚变装置;第二阶段,美国、苏联、英国等国在极其保密情况下激烈竞争;第三阶段,开始解密并将重点转移到对高温等离子体基本性

质的研究;第四阶段,世界范围内出现托卡马克研究热潮并不断取得重要进展。

一、几种主要聚变实验装置的发明

1. 斯必泽与仿星器

1951 年 3 月 25 日,美国许多报纸在头版刊登了一条惊人的消息:一位德国血统的物理学家吕克特 (Richter) 于 2 月 16 日在阿根廷的休爱密勒岛上的实验室内成功地实现了热核聚变反应,获得了由此释放的可控制的原子能^[5]。当然,科学界对此普遍持怀疑态度。然而,这样一条不寻常的消息在当时曾引起不少人的思考。普林斯顿大学天体物理学教授斯必泽 (L. Spitzer)^[6] 当时正准备去克罗地亚的 Aspen 滑雪场度假。动身之前,他父亲打电话让他看《纽约时报》上关于核聚变的那篇文章。他放下电话马上去找那张报纸。在滑雪场的日子里,斯必泽认真思考了实现受控核聚变必须解决的等离子体约束方式和能量平衡这两个主要问题。最初他设想用磁场将等离子体约束在圆柱内。为了解决等离子体从两端泄漏的问题,最简单的方法是将直圆柱变成环状。然而,这样又会出现新的严重问题:在环形装置中由于外部线圈产生的环形磁场内侧强,外侧弱,等离子体中的离子将朝下漂移,电子朝上漂移,正负电荷分离产生的电场与磁场相互作用便将等离子体朝外推向器壁。4 月 8 日,斯必泽离开滑雪场回到普林斯顿大学。几天之后他便提出了解决漂移问题的办法:将环形容器巧妙地扭成 8 字型 (图 1)。等离子体沿 8 字形装置内部运动一圈时总的漂移便被抵消了。5 月末,斯必泽和他的同事维勒 (Wheeler) 给这种装置取

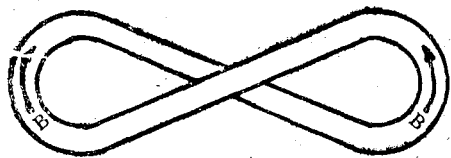


图1 8字型仿星器示意图

名为仿星器(Stellarator),意思是说在这种装置内将以类似于星球上的方式发生聚变核反应,释放能量。该年7月,斯必泽获得5万美元资助开始理论计算工作。1952年1月,他申请并获得了开展实验研究的经费。他建立的第一个仿星器是个供桌面上试验的原理性小型仿星器 Model-A,后来又建造了规模较大的 Model-B 和 Model-C。

2. 汤姆孙、塔克与箍缩装置 (pinch)

1946年,英国伦敦大学帝国学院的物理学教授汤姆孙(G. P. Thomson)和他的同事布莱克曼(M. Blackman)提出了环形箍缩(Toroidal pinch)的原理^[6],利用环形等离子体自身产生的磁场约束等离子体,使其与器壁脱离。1947年初,他们便建立了一个环形箍缩装置,还建造了一个直线箍缩装置(Linear pinch)。另一位英国科学家塔克(J. Tuck)在第二次世界大战期间曾去美国参加研制原子弹的“曼哈顿计划”。1946年,他回到英国并得到了资助,进行箍缩装置的实验研究。当他正忙于安装设备时,又被召回到美国洛斯阿拉莫斯实验室参加氢弹研究。在这期间,他仍一直对受控核聚变有着极大的热情。1951年底,他得到了5万美元的经费建立了一个环形箍缩装置,取名为“或许器”(perhapsatron)。洛斯阿拉莫斯实验室研究氢弹用的那些适合于快速爆炸过程的测量仪器和设备也可以用于快脉冲核聚变装置。塔克用高速摄影机通过环形箍缩装置真空室的侧面狭缝对等离子体进行照相,观察到了等离子体箍缩现象。从照片上看到等离子体形成后,在几微秒的极短时间内便出现了不稳定性,而后便很快破裂了。由此认识到必须探索解决不稳定性新途径。

3. 波斯特和磁镜装置^[6]

1952年初,旧金山东南小镇利弗莫郊外的辐射实验室决定建立一个研究热核武器的机构,年轻的约克(H. York)被指定为负责人。他走访了普林斯顿,也到过洛斯阿拉莫斯,跟斯必泽和塔克讨论了仿星器和箍缩装置等受控核聚变问题。为了拓宽研究领域,提高实验室声誉,约克决定在利弗莫除了研究热核武器外,也开展受控核聚变研究。他详细地比较了斯必泽的仿星器和塔克的箍缩装置之后,决定采用与众不同的方法,自己闯出一条新路。他想用外部线圈产生的磁场约束等离子体,但并不是采用闭合磁力线的方法,而是通过别的方式解决直圆柱等离子体的终端泄漏问题。当时,有一位名叫波斯特(R. Post)的年轻博士刚从斯坦福大学毕业,到利弗莫从事同步辐射的研究。他具有微波和等离子体两方面的背景知识。约克邀请他参加核聚变的研究。波斯特从当时观察到的宇宙射线现象得到启发。当宇宙射线中带电粒子进入地球磁场后,由于地球两极附近区域内磁场强,其它区域内磁场弱,因此宇宙射线在沿磁力线作螺旋运动过程中遇到强磁场区便被反射回来,并被捕获在两极强磁场区域之间来回反射(图2)。这种现象被称作磁镜效应。波斯特提出利用磁镜效应解决直线型聚变装置中等离子体从终端泄漏的问题。1952年,他们建立了一个直线型等离子体装置,容器是一个内径为

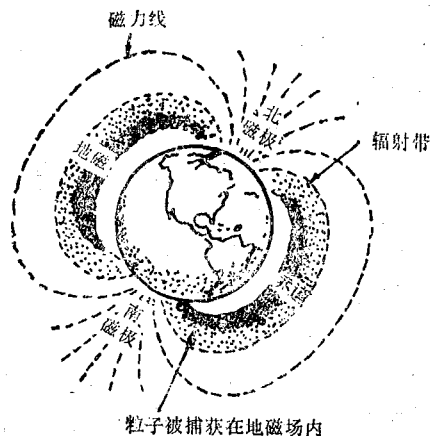


图2 地磁场提供了约束带电粒子的“磁镜”,粒子在两极之间反射而被捕获在地磁场内

10cm 长 1m 的硬质玻璃管。外部绕有螺旋管线圈,每个端部都放置一个磁镜线圈,以便在端部产生比中心部位强得多的磁场。以后人们便将类似于波斯特聚变实验装置的,都统称为磁镜装置。后来为了克服等离子体不稳定性又引入极小 B 概念,出现了约飞棒和垒球缝的磁场位形。为了进一步解决终端损失,又出现了将多个磁镜串联起来组成的折皱环和新颖的串联磁镜概念。

4. 阿齐莫维奇和托卡马克^[7,8]

50 年代初,苏联物理学家塔姆 (Tamm) 和萨哈罗夫 (Sakharov) 提出,在环形等离子体中通过大电流感应产生的极向磁场跟很强的环向(纵向)磁场结合起来,便可能实现等离子体平衡位形。莫斯科的库尔恰托夫研究所在阿齐莫维奇 (L. A. Artsimovich) 领导下开展了此项实验研究。他们在环形陶瓷真空室外套很多匝线圈,充电后的电容器组向这些串联的线圈放电,在真空室内形成了环形磁场。由变压器回路放电产生的等离子体电流自身感应的磁场叫做极向磁场。外部线圈产生的磁场叫做纵向磁场,该线圈称为纵场线圈。他们将这种装置叫做托卡马克 (Tokamak)。这个词是 toroidal (环形的), kamera (真空室), magnit (磁) 的头两个字母以及 katushka (线圈) 的第一个字母组成的缩写词。图 3 是初期托卡马克装置的示意图。最初的实验结果并不理想。后来将陶瓷真空室改为不锈钢真空室,并改进了纵场线圈的制造工艺,增加了线圈匝数以改善磁场波纹度。1965 年,托卡马克等离子体的性能得到很大提高,明显优于其它环形装置。1968 年, T-3 和 TM-3 托卡马克取得了令人震惊的重要进展,电子温度 1 keV,离子温度 0.5 keV,等离子体约束时间超过了“玻姆扩散时间”(Bohm diffusion time) 的 50 倍。这一重要成就为核聚变研究指出了光辉前景,使困惑多年的等离子体物理学家受到了极大鼓舞。从此后核聚变研究在世界范围内受到更广泛的支持,并不断取得重大进展。毋庸置疑,阿齐莫维奇以及他首创的托卡马克装置为国际核聚变研究的发展作出了

杰出的贡献。他逝世后,国际原子能委员会主持召开的每一次等离子体物理和受控核聚变研究国际学术会议上都有一篇专题报告纪念阿齐莫维奇的功绩。

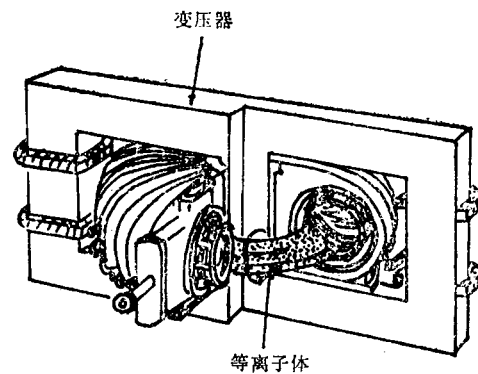


图 3 托卡马克示意图

二、初期的过高期望和激烈的国际竞争

50 年代初期,尽管受控核聚变研究处于早期的探索阶段,但是受到了广泛的重视。在美国,普林斯顿大学、洛斯阿拉莫斯科学实验室、加利福尼亚的利弗莫辐射实验室和橡树岭国家实验室都开展核聚变研究。1953 年,美国原子能委员会成立了“薛伍德方案”(Project Sherwood)^[9] 实施小组专门负责核聚变研究,并拨出了大量研究经费。受控核聚变受到如此重视,有其科学上、社会上、军事上和政治上的原因。在科学方面,因为研究受控核聚变是为了探索理想的新能源,为人类造福,这对科学家具有很大吸引力。在第二次世界大战期间成功地研制了原子弹的一批优秀物理学家热情高涨,为他们具有能够征服各种科学难题的非凡能力而自豪。他们乐于投入这种研究。从社会上讲,有识之士早在 1951 年就指出地球上煤、石油等矿物燃料资源在 100 年后可能会枯竭,因此必须探索研究新能源。核能是重要的候选者,但是裂变能源对环境的放射性污染是令人担忧的。核聚变能源没有污染问题,很容易受到社会的承认和接纳。在军事方面,除了氢弹的直接军事用途之外,受控核聚变产生的大量 14MeV 的

中子在制造核燃料方面有着重要应用。在政治上,第二次世界大战后形成的东方社会主义和西方资本主义两大阵营之间展开了一场竞赛。当时的美国原子能委员会主席施特劳斯(Strauss)^[5]曾认为,实现受控核聚变只是五年到十年之内的事情,他要在他任期内实现这件科学上的大事。他还声称要以此证明“资本主义比社会主义好”。为此他要求受控核聚变研究必须在极其保密的情况下进行,即使在美国国内也是保密的。严格的保密状态,激烈的竞争意识和急于取胜的心理,不仅使各国之间不可能进行必要的学术交流,还往往导致错误的分析和估计。1956年前后,美国曾错误地认为苏联已经能够批量生产微型聚变反应堆了,因此马上增加财政投资,曾想于1958年9月在日内瓦召开的第二届和平利用原子能会议上展示出他们制造的能够产生热中子的聚变装置。可是,最终在日内瓦会议上展出的仅仅是仿星器-C的模型以及其它几个小型聚变实验装置。当然,苏联实际上也并没有能力研制出所谓“微型聚变反应堆”。

三、解密和研究重点的转移

1958年是核聚变研究发生重大转折的一年。研究初期的过高期望没有实现,各类装置的高温等离子体普遍出现不稳定性现象,约束性能很差,等离子体温度也与受控核聚变的要求相差甚远。严格保密,各国之间互相封锁情报当然是阻碍核聚变研究发展的重要原因。此外,当时的重点是寻找实现核聚变的具体途径,对高温等离子体基本性质缺乏系统的研究也是重要原因。当时,尽管已有一批分别在与核聚变有关的各个分支领域内造诣很深的物理学家,象斯必泽这样的天体物理学家对星际空间的冷等离子体和恒星内部的热等离子体很有研究;象汤姆孙这样的气体动力学专家在实验室内气体放电中的弱电等离子体的研究方面很有造诣;象塔克、威尔孙(Wilson)这样的加速器专家在特殊磁场及各种电源的设计方面十分

熟练;象约翰孙(T. Johnson)这样的宇宙射线科学家对于带电粒子在复杂磁场位形中的运动规律已有很多研究经验;还有在洛斯阿拉莫斯的一批研究核武器的专家,他们在快速爆炸物理现象的测量方面所用的特殊方法和仪器设备对核聚变研究都是有用的。但是并没有一位科学家对受控核聚变和高温等离子体物理有比较全面深刻的了解。在遭到挫折后,人们普遍感到应该尽快采取如下两条措施:其一是解密,加强各国之间的学术交流和相互合作;其二是将研究重点从急于建成聚变反应堆转向对高温等离子体进行系统的基础性研究。

1958年前,美国、英国和苏联都在试探国际范围内交流核聚变方面研究情报的可能性。1956年4月25日,当时的苏联总理赫鲁晓夫率代表团访问英国的哈威尔(Harwell)科学实验室。苏联科学家库尔恰托夫(Kurchatov)在那里作了关于用气体放电能否实现核聚变反应的学术报告^[10]。1956年11月,美国派了一个科学家代表团访问英国,参观了ZETA装置。从那以后,核聚变研究的论文开始在杂志上发表。1957年1月发表了有关劳孙条件的论文^[11]。1957年7月,英国和美国正式达成了在受控核聚变研究领域内解密,双方公布研究资料的协议。1958年1月25日,《自然》杂志同时发表了英国的ZETA装置和Sceptre装置的资料,以及美国洛斯阿拉莫斯科学实验室(LASA)的Perhapsatron S-3和直线箍缩装置Columbus II和Columbus S-4的资料^[12]。1958年9月1日至13日,在日内瓦举行了第二届和平利用原子能国际会议^[13],美国、苏联和英国在会议上展出了各种各样的核聚变实验装置,有的是实物,有的是模型,还公布了所有研究资料。

1958年以后,国际学术交流日趋频繁。1960年5月和6月,苏联和美国互派科学家代表团访问对方的聚变研究实验室。国际原子能委员会于1960年创办了《核聚变》杂志,专门发表核聚变研究方面的高质量科学论文。1962年,国际原子能委员会在萨尔茨伯格(Salzburg)召开了关于等离子体物理和受控核聚变研究的第

一届国际会议^[4],以后每三年举行一次,从1976年起改为每两年召开一次。此外,还有定期召开的核聚变工程会议以及有关高温等离子体的约束和加热等方面的各种专题学术会议。

四、研究托卡马克的热潮

1968年,受控核聚变研究发生了又一次重大转折。这年8月,在苏联的诺沃西比尔斯克(Novosibirsk)召开了等离子体物理和受控核聚变研究的第三届国际会议^[5]。会上报告了仿星器-C以及磁镜装置等方面取得的新进展。会上还首次发表了有关激光等离子体方面的论文。然而,会议上最令人瞩目的还是阿齐莫维奇发表的T-3托卡马克上取得的最新实验结果:电子温度1keV,离子温度0.5keV, $n\tau$ 值达到 $10^{13}\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$ 。在那时,高达1keV的等离子体被约束了几毫秒,这件事实在令人震惊。但是,会议上不少人怀疑电子温度的计算是否正确。当时激光技术刚问世不久,苏联还没有能直接测量电子温度的激光散射诊断技术。他们公布的电子温度是以假设等离子体中的电子服从麦克斯韦分布为前提推导出来的。普林斯顿的科学家弗思(H. Furth)等人则认为等离子体中电子可能不服从麦克斯韦分布,他们测量到的很可能是其中一部分高能逃逸电子的能量。

如果T-3托卡马克电子温度测量是正确的话,那么在诺沃西比尔斯克会议上发表的托卡马克最新实验结果将具有划时代的意义。为了证实这件事,在阿齐莫维奇邀请下,英国卡拉姆实验室主任皮斯(R. S. Pease)带领了等离子体诊断专家小组,于1969年春天携带最先进、最可靠的红宝石激光散射系统到苏联库尔恰托夫研究所,重新测量T-3托卡马克等离子体电子温度。1969年8月,英国科学家获得了可以重复的可靠实验数据,证明T-3托卡马克的实验结果是正确的,整体电子温度达到了1keV,电子是服从麦克斯韦分布的,排除了弗思等人起初提出的关于逃逸电子的可能性。专家小组立即用电话向英国的卡拉姆实验室报告这

一结果,英国又马上用电话告诉华盛顿。这一消息十分令人鼓舞,据说当时华盛顿负责核聚变的办公室内气氛十分活跃,有一位名叫Eastlund的工作人员听到这消息后竟然跳到办公桌上跳起舞来了^[6]。于是,世界范围内便很快掀起了研究托卡马克的热潮。普林斯顿实验室为了尽快重复T-3的实验结果,把仿星器-C改装成ST托卡马克。橡树岭实验室建造了奥尔马克(Ormark),法国冯克奈-奥-罗兹(Fonteney-aux-Roses)研究所建造了TFR托卡马克,英国卡拉姆实验室建造了克利奥(Cleo),日本原子能研究所建造了JFT-II托卡马克,西德的马克思-普朗克(Max Planck)研究所建造了普尔萨特(Pulsator)托卡马克。几年之后,我国也开始了有关托卡马克的研究,小型托卡马克CT-6装置已于1975年投入运行。

70年代后期以来,核聚变研究无论在理论方面还是实验方面都取得了许多重要进展,托卡马克等离子体参数大大提高了。1978年,在PLT托卡马克上采用中性注入加热方法,使离子温度提高到了7.6keV。1983年,Alcator托卡马克利用靶丸注入方式实现了高密度运行,使 $n\tau$ 值提高到 $8\times 10^{19}\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$ 。70年代后期开始建造四个大型托卡马克:美国的TFTR,日本的JT-60,欧洲的JET和苏联的T-15。前三个装置在前几年已分别建成并投入运行,实验结果比科学家们预想的要好得多,取得了十分令人鼓舞的重大进展。1986年,TFTR的Supershot放电创造了离子温度的世界纪录,高达20keV,超过了聚变点火的要求,而且约束性能也有很大改善,实现了“H模约束特性”的稳定放电^[16]。JET的高温等离子体综合参数得到很大改善。JT-60首次实现了在大装置上用低混杂波驱动兆安级等离子体电流^[17]。近年来,科学家们用劳孙判据 $n\tau$ 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。到1988年, $n\tau T_i$ 值已达到 $3.2\times 10^{20}\text{m}^{-3}\cdot\text{s}\cdot\text{keV}$,离聚变点火仅差10倍左右,这是十分令人鼓舞的,基本上证明了核聚变的科学可行性。(下转第84页)